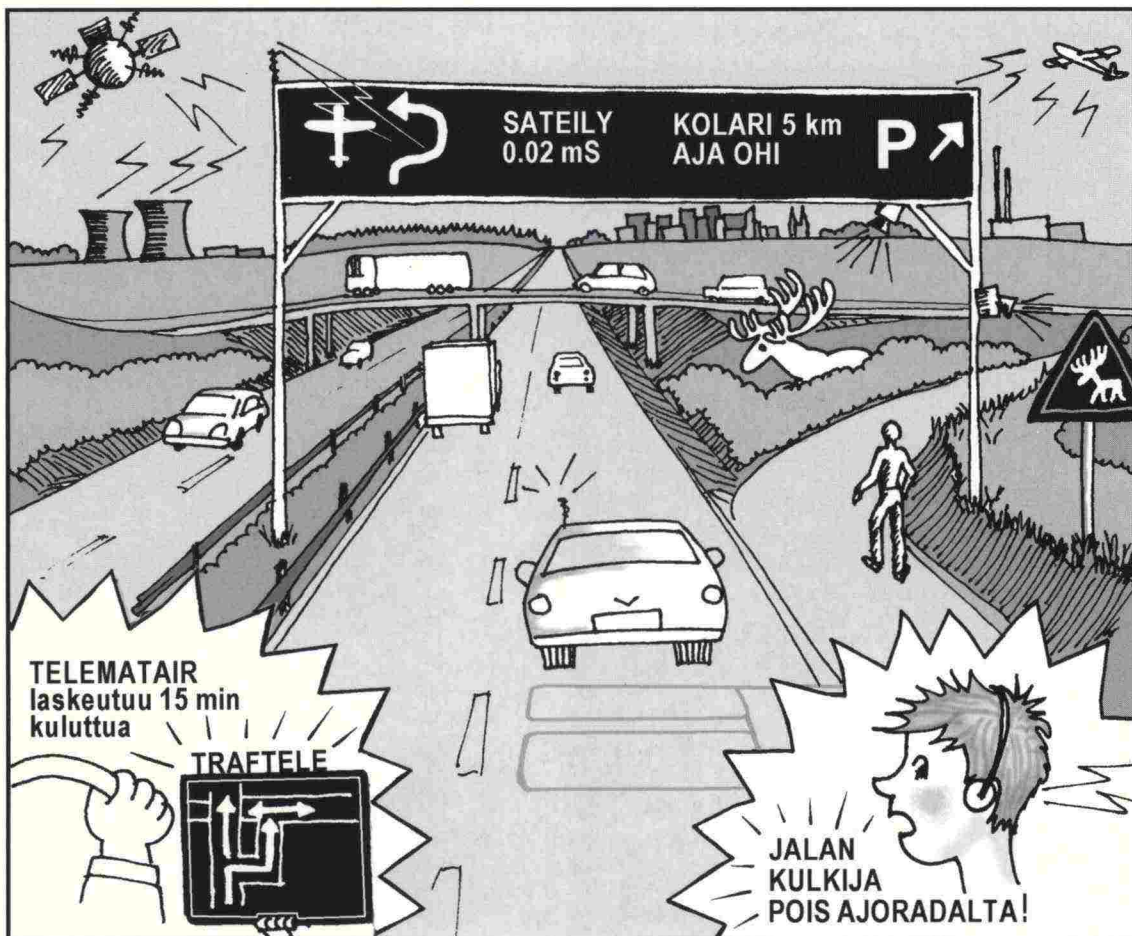


Satu Innamaa ja Matti Pursula

Automaattiset liikenteen ohjaus- ja tiedotusjärjestelmät

Järjestelmien rakenne ja toiminta

Tiehallinnon selvityksiä 23/2002



Satu Innamaa ja Matti Pursula

Automaattiset liikenteen ohjaus- ja tiedotusjärjestelmät

Järjestelmien rakenne ja toiminta

Tiehallinnon selvityksiä 23/2002

ISSN1457-9871
ISBN 951-726-898-X
TIEH 3200755

Edita Prima Oy
Helsinki 2002

Julkaisua myy:
Tiehallinto, julkaisumyynti
telefaksi 0204 22 2652
e-mail julkaisumyynti@tiehallinto.fi



TIEHALLINTO
Liikenteen palvelut
PL 33
00521 HELSINKI
Puhelinvaihte 0204 22 150

Satu Innamaa ja Matti Pursula: Automaattiset liikenteen ohjaus- ja tiedotusjärjestelmät. Järjestelmien rakenne ja toiminta. Helsinki 2002. Tiehallinto, liikenteen palvelut. Tiehallinnon selvityksiä 23/2002. 69 s. + liitt. 10 s. ISSN 1457-9871, ISBN 951-726-898-X, TIEH 3200755.

Asiasanat: telematiikka, liikenteen hallinta, liikenteen seuranta, liikenteen tiedotus, liikennevirta, muuttuvat opasteet
Aiheluokka: 11, 20, 22

TIIVISTELMÄ

Liikenteen ohjaus- ja tiedotusjärjestelmät koostuvat kolmesta pääosasta: 1) mittausosasta, 2) tulkintaosasta ja 3) tiedotus- tai ohjausosasta. Tutkimuksessa on selvitty näiden kolmen osan välisiä riippuvaisuuksia, jotta järjestelmistä saataisiin mahdollisimman suuri hyöty. Tutkimuksessa on myös pohdittu esimerkinomaisesti, minkälainen Länsiväylän automaattisen liikenteen ohjausjärjestelmän ohjausstrategian tulisi olla, jotta järjestelmän hyöty olisi mahdollisimman suuri.

Ensimmäinen askel liikenteellisen ongelman ratkaisemiseksi on poikkeavan liikennetilanteen tunnistaminen. Kun ongelmallinen liikennetilanne on tunnistettu ja yksilöity, sille voidaan ryhtyä etsimään ratkaisua. Ratkaisu voidaan pilkkoa osatavoitteisiin ja kukin osatavoite voidaan saavuttaa yhdellä tai useammalla keinolla. Sama keino saattaa olla ratkaisuna useamman tavoitteen saavuttamiseksi.

Eri syistä aiheutuvat liikenteen ongelmat voidaan usein ratkaista erilaisten tavoitteiden avulla. Yksittäisen ongelman ratkaisemiseksi voidaan asettaa useita eri tavoitteita ja yksittäinen tavoite voi helpottaa useampaa eriongelmaa.

Monet tulokset viittaavat siihen, että olosuhteisiin nähden oikeanlaisella ohjauksella saadaan aikaan haluttuja tuloksia: voidaan säätää keskinopeuden tasoa ja pienentää nopeuskeskihajontaa. Tulokset viittaavat kuitenkin siihen, ettei "turha" varovaisuus kannata liikenteen ohjauksessa, vaan sillä saadaan tehdä liikennevirrasta jopa häiriöherkempi kuin se muutoin olisi. Parasta ohjausta ja liikenteen tiedotusta kuvaavat siis sanat ajantasainen ja tilanteeseen sopiva.

Länsiväylälle on asennettu liikenteen ruuhkautumisesta ja jonoista varoittava ohjausjärjestelmä. Arvioitaessa, pitääkö nopeusrajoitusta laskea tai nostaa ja ruuhkavaroitusta antaa, käytetään nopeuden kynnysarvoja. Ohjausstrategian heikkoutena on, ettei järjestelmä kykene ennakoimaan ruuhkan syntymistä. Olisi parasta, jos järjestelmä ennakoisi liikennevirran ruuhkautumisen ja yrittäisi ehkäistä sitä. Sen sijaan, että nopeusrajoituksia ainoastaan sopeutetaan vallitsevaan tilanteeseen, olisi parempi, että niillä yritettäisiin aktiivisesti pienentää ruuhkautumisen riskiä.

Hyvä strategia olisi, että kun virta tulee ennalta määritettyä riskirajaa häiriöherkemäksi, nopeusrajoituksia lasketaan, jolloin häiriöiden riski saadaan pienemmäksi. Vastaavasti nopeusrajoitusta voidaan nostaa, kun arvioidaan, että häiriintymisen riski on ylemmällä nopeusrajoituksella riittävän pieni.

Ruuhkautumisriski määritettiin usean eri tekijän funktiona. Oletuksena oli, ettei mikään olosuhderyhmä (ajankohtaan, liikennetilanteeseen tai ulkoisiin olosuhteisiin liittyvä) riitä yksinään kuvaamaan ruuhka- tai ruuhkautumisriskiä, vaan riittävän kokonaiskuvan saamiseksi tilannetta on tarkasteltava kokonaisuutena. Tutkimuksessa onnistuttiinkin löytämään kriteerit, joiden avulla ruuhkaantuminen kyetään ennakoimaan nykyistä luotettavammin.

Satu Innamaa ja Matti Pursula: Automaattiset liikenteen ohjaus- ja tiedotusjärjestelmät. Järjestelmien rakenne ja toiminta. [Automatic traffic control and information systems. The structure and functioning of the systems.] Helsinki 2002. Finnish Road Administration. Finnra Reports 23/2002. 69 p. + app. 10 p. ISSN 1457-9871, ISBN 951-726-898-X, TIEH 3200755.

Keywords: traffic telematics, traffic management, traffic monitoring, traffic control, traffic information, traffic flow, variable message sign

SUMMARY

Traffic control and information systems consist of three main units: 1) a measurement unit, 2) an interpretation unit, and 3) an information or control unit. The interdependencies between the units have been studied in this research in order to obtain maximal benefit of the systems. To set an example, it has been considered what kind of control strategy should the automatic traffic control system of Länsiväylä have in order to maximise the benefits of the system.

The first step to deal with a traffic problem is to identify abnormal traffic situations. After an abnormal situation has been identified, the solution to the problem can be looked for. The solution can be cut into sub-goals and each sub-goal can be reached with one or several means. The same means can be the solution for reaching several goals.

Traffic problems caused by different reasons can often be solved by using different goals. Several goals can be set to solve one single problem and one single goal can ease several problems.

Many results indicate that desired results can be obtained with control appropriate to the circumstances: the mean speed level can be adjusted and the speed deviation reduced. However, the results indicate that "unnecessary" caution is not beneficial, as it may make the traffic flow more exposed to incidents than it otherwise would be. Thus, the best kind of control and traffic information can be described as real time and suitable to the situation.

A traffic control system that warns about congestion and queues has been installed to the urban motorway of Länsiväylä. Threshold values for speed are used to estimate whether the speed limit should be lowered or raised and whether a congestion warning should be given. The weakness of the control strategy is that the system cannot anticipate the congestion. It would be best, if the system could anticipate the beginning of the congestion and would try to prevent it. Instead of adjusting the speed limits to the present situation, it would be better to actively try to reduce the risk of congestion.

A good strategy would be that when the flow becomes more exposed to incidents than a previously set risk limit, the speed limits are lowered in order to lower the incident risk. Respectively, the speed limit can be raised when the incident risk is considered to be small enough for the higher speed limit.

The risk of congestion was determined as a function of several different factors. It was assumed that none of the circumstance groups (related to the point in time, traffic situation or to the outward circumstances) cannot describe the risk of congestion or getting congested alone, but the situation has to be considered as an entirety in order to get a general view of it. The research came off with a criteria with which the beginning of the congestion can be anticipated more reliably than currently.

ESIPUHE

Tiehallinto sekä liikenne- ja viestintäministeriö ovat tilanneet tutkimuksen automaattisista liikenteen ohjaus- ja tiedotusjärjestelmistä osana ministeriön FITS – Liikennetelematiikan rakenteiden ja palvelujen tutkimus- ja kehittämisohjelmaa 2001–2004. Tämä tutkimus on valmistunut osana kyseistä toimeksiantoa.

Tutkimuksesta vastasi diplomi-insinööri Satu Innamaa. Hän työskenteli työn alkuvaiheessa Teknillisen korkeakoulun (TKK) liikennelaboratoriossa ja loppuvaiheessa VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikassa. TKK:lla tutkimusapulaisena toimi tekniikan ylioppilas Kerkko Vanhanen.

Tutkimuksen etenemistä valvoi asiantuntijaryhmä, johon kuuluivat liikenne-neuvos Matti Roine liikenne- ja viestintäministeriöstä, kehitysinsinöörit Sami Luoma ja Jyri Vilhunen Tiehallinnon liikenteen palvelut –yksiköstä, liikenne-keskusvastaava Mauri Pyykönen ja liikenteen palvelupäällikkö Jyri Mustonen Uudenmaan tiepiiristä, professori Matti Pursula ja opettava tutkija Iisakki Kosonen TKK:n liikennelaboratoriosta sekä tutkimusprofessori Risto Kulmala VTT:sta.

Helsinki, kesäkuussa 2002

Tiehallinto
Liikenteen palvelut

Sisältö

1	JOHDANTO	7
2	TARKASTELUPERIAATE JA TIETYYPIT	9
2.1	Tarkasteluperiaate	9
2.2	Tarkasteltavat tiettyypit ja niiden liikenteelliset ongelmat	10
3	LIIKENTEEEN OHJAUS- JA TIEDOTUSJÄRJESTELMILLE ASETETUT TAVOITTEET	13
3.1	Tavoitteet	13
3.2	Sujuvuuteen vaikuttavat tekijät	15
3.3	Turvallisuuteen vaikuttavat tekijät	18
4	LIIKENTEEEN OHJAUS	20
4.1	Liikenteen ongelmien seuraukset ja mittarit	20
4.2	Poikkeuksellisten liikennetilanteiden hallinnan tavoitteita	21
4.3	Liikenteen ohjauksen ja tiedotuksen vaikutukset liikennevirtaan	24
4.4	Ohjaustavan valinta	25
5	LIIKENTEEEN SEURANTA	28
5.1	Liikenteen seurantamenetelmän valinta	28
5.2	Seurantajärjestelmän rakenne	33
5.3	Teoreettinen ilmaisinten minimitiheys	35
5.4	Algoritmeja satunnaisten häiriöiden havaitsemiseen	38
6	LÄNSIVÄYLÄYLÄN AUTOMAATTINEN LIIKENTEEEN OHJAUSJÄRJESTELMÄ	43
6.1	Länsiväylän nykyinen liikenteen ohjausjärjestelmä	43
6.2	Parannusehdotus Länsiväylän liikenteen ohjausjärjestelmään	44
6.3	Ruuhkaantumisen ja ruuhkan riski	46
6.4	Ruuhkan ennakointi	56
7	JOHTOPÄÄTÖKSIÄ	61
8	YHTEENVETO	62
	LÄHDELUETTELO	64
	LIITTEET	69

1 JOHDANTO

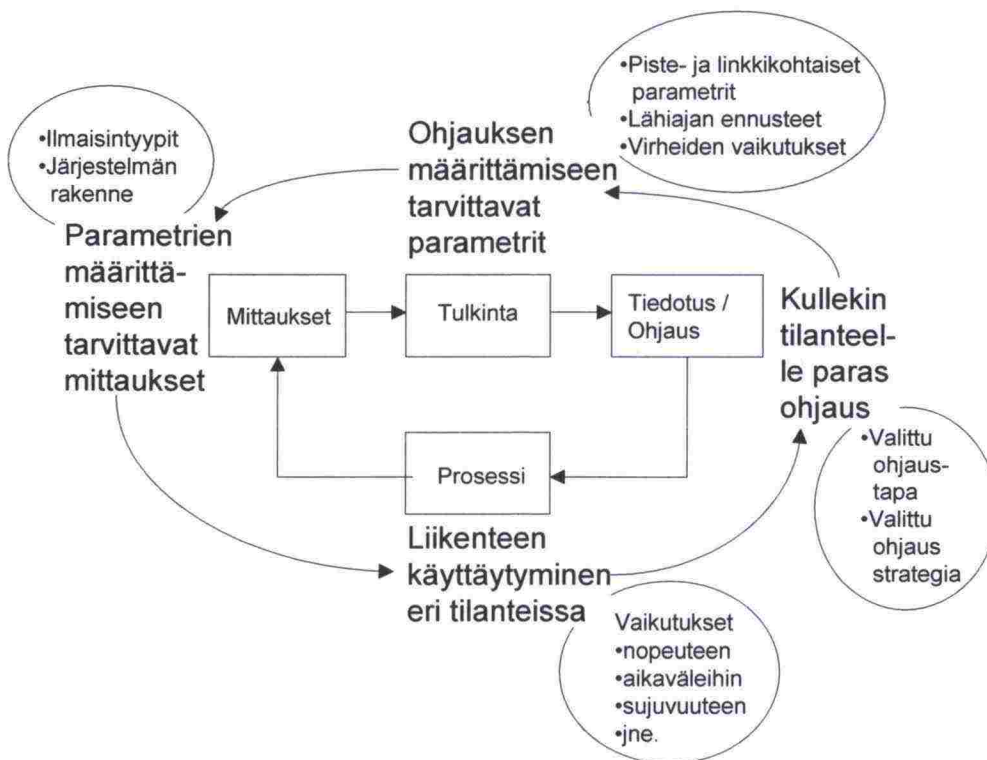
Tutkimuksen tarkoituksena on analysoida moottoriväylien ja sekaliikenneteiden automaattisten liikenteen ohjaus- ja tiedotusjärjestelmien rakenteen ja toiminnan välistä yhteyttä. Tavoitteena on selvittää, kuinka valita kuhunkin tilanteeseen parhaiten sopiva järjestelmä tai kuinka hyötyä olemassa olevista laitteista mahdollisimman paljon. Raportti myös tutustuttaa liikenteen ohjauksen pariin siirtyvän henkilön erilaisiin järjestelmiin ja tekijöihin, jotka vaikuttavat niiden toimintaan.

Tutkimuksen aihe on hyvin ajankohtainen. Jatkuvasti kasvavat liikennemäärät aiheuttavat yhä enenevässä määrin ruuhkaa sekä kasvavan liikenneturvallisuus- ja ympäristöongelman. Liikenteen ohjaus- ja tiedotusjärjestelmät ovat yksi ratkaisu näihin ongelmiin. Tiehallinto onkin rakentamassa erilaisia automaattisia järjestelmiä Suomen pääteille.

Liikenteen ohjaus- ja tiedotusjärjestelmät koostuvat kolmesta pääosasta: 1) mittausosasta, joka tekee havaintoja liikenteestä, 2) tulkintaosasta, joka nimensä mukaisesti tulkitsee mittausosasta tulevat signaalit nopeus-, aikaväli- ynnä muiksi havainnoiksi ja määrittelee vallitsevan liikennetilanteen sekä 3) tiedotus- tai ohjausosasta, joka ennustaa tulevaa liikennettä ja erilaisten ohjaus- tai tiedotusvaihtoehtojen vaikutusta sekä valitsee kuhunkin tilanteeseen parhaiten sopivan ohjaus- tai tiedotusvaihtoehdon.

Tutkimuksessa on tarkoitus selvittää näiden kolmen osan välisiä riippuvaisuuksia, jotta halutulle liikenteen ohjaus- tai tiedotusjärjestelmälle saadaan valittua mahdollisimman hyvä tulkinta- ja mittausjärjestelmä. Näin järjestelmistä saadaan mahdollisimman suuri hyöty. Tutkimuksessa pohditaan myös esimerkinomaisesti, minkälainen tulisi Länsiväylän automaattisen liikenteen ohjausjärjestelmän ohjausstrategian olla, jotta järjestelmän hyöty olisi mahdollisimman suuri.

Kuvassa 1 on esitetty liikenteen ohjausprosessi ja sen komponentit. Perusprosessina on mittauksen, tulkinnan, tiedotuksen/ohjauksen ja liikenneprosessin muodostama silmukka. Kullekin tilanteelle sopiva ohjaus pitäisi määrittää sen perusteella, kuinka liikenne käyttäytyy eri olosuhteissa ja erilaisilla ohjauksilla. Ohjausstrategia määrittelee, mitä liikennevirtaparametreja halutaan mitata, ja ilmaisintyytit ja -sijainnit pitäisi määrittellä näiden parametrien perusteella. On kuitenkin otettava huomioon, että yksi ja sama mittausjärjestelmä voi palvella useita liikenteen hallinnan sovelluksia.



Kuva 1. Liikenteen ohjausprosessi ja sen komponentit.

Selvityksen luvussa 2 esitellään tarkasteluperiaate ja tutkimuksessa mukana olevat tietyypit. Luvussa 3 käsitellään liikenteen ohjaus- ja tiedotusjärjestelmille asetettuja tavoitteita sekä turvallisuuteen ja sujuvuuteen vaikuttavia tekijöitä. Luku 4 käsittelee liikenteen ohjausta ja luku 5 liikenteen seurantaan sekä sitä, mitä seikkoja pitäisi ottaa huomioon järjestelmiä suunniteltaessa. Luvussa 6 on käsitelty esimerkkinä Länsiväylän ruuhkaohjausjärjestelmää. Luvussa 7 on esitetty tutkimuksen pohjalta tehtyjä johtopäätöksiä ja suosituksia sekä luvussa 8 yhteenveto.

Liitteenä A on esitelty tarkemmin liikenteen ohjaus- ja tiedotusjärjestelmien vaikutuksia liikennevirtaan ja liitteessä B liikenteen mittausmenetelmiä. Nämä liitteet perustuvat suurelta osin vuonna 1999 tehtyyn kirjallisuusselvitykseen (Innamaa 1999). Liitteessä C on esitetty Länsiväylän liikennevirtaa, ruuhkaa ja sen ominaisuuksia esittäviä kuvaajia.

2 TARKASTELUPERIAATE JA TIETYYPIT

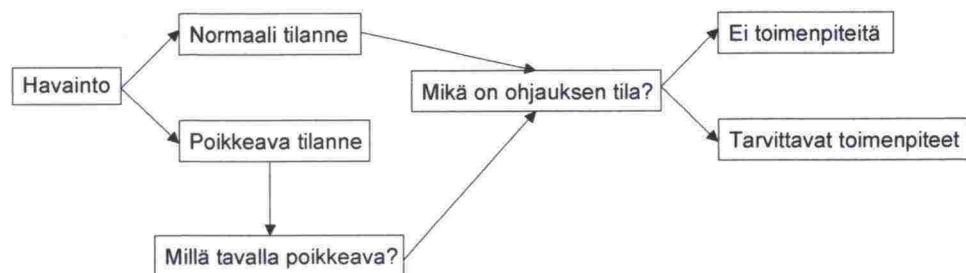
2.1 Tarkasteluperiaate

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan erityyppisten teiden erilaisia liikennetilanteita ja keinoja ongelmallisten tilanteiden ratkaisuun sekä uusia mahdollisuuksia, joita seuranta- ynnä muut järjestelmät tarjoavat.

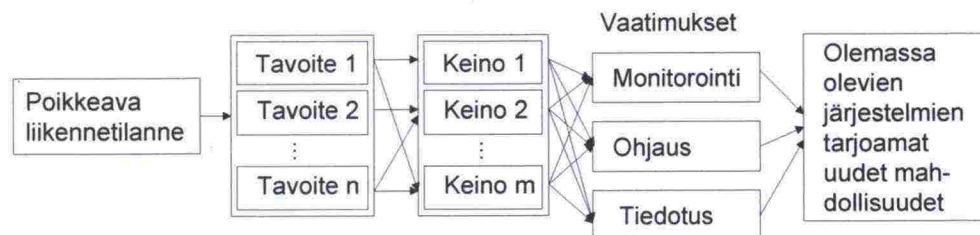
Liikenteen ohjausjärjestelmällä on kaksi tehtävää:

- havaita erilaiset liikenteen häiriöt ja ongelmatilat ja erottaa ne "normaaleista" liikennetilanteista
- ratkaista ongelma tai ainakin helpottaa tilannetta.

Ensimmäinen askel liikenteellisen ongelman ratkaisemiseksi on siis poikkeavan liikennetilanteen tunnistaminen (kuva 2). Osa liikennetilanteista johtaa ongelmiin sekä ohjaus- ja tiedotustarpeisiin. Kun tällainen liikennetilanne on tunnistettu ja yksilöity, sille voidaan ryhtyä etsimään ratkaisua. Ratkaisu voidaan pilkkoa osatavoitteisiin (kuva 3). Kukin osatavoite voidaan saavuttaa yhdellä tai useammalla keinolla (ohjaustoimenpide tai tiedotus) ja sama keino saattaa olla ratkaisuna useamman tavoitteen saavuttamiseksi. Kukin keino asettaa omat vaatimuksensa seuranta-, ohjaus- ja tiedotusjärjestelmälle.



Kuva 2. Ohjauksen tarpeen arviointi.



Kuva 3. Poikkeavan liikennetilanteen selvittäminen.

Kun erilaiset ongelmatilanteet on yksilöity ja on valittu tavoitteet, jotka ongelmanratkaisemiseksi halutaan saavuttaa, näiden tavoitteiden saavuttamiseksi on valittu keinot ja on selvitetty kunkin keinon asettamat vaatimukset seuranta-, ohjaus- ja tiedotusjärjestelmälle, voidaan kaaviota tarkastella toiseen suuntaan. Tällä tarkoitetaan sitä, että tarkastellaan, mitä muita ohjaustoimenpiteitä (keinoja) edellä asetettujen tavoitteiden saavuttamiseksi voidaan käyttää tai mitä muita tavoitteita voidaan saavuttaa samalla laitteistolla, joka tielle on jo asennettu tai voidaan mahdollisesti asentaa pienin lisäinvestoinnein.

Jos liikennesuorite kasvaa tulevaisuudessa, voidaan olettaa, että yksittäisen tien liikenteelliset ongelmat pahenevat, jollei tien välityskykyä lisätä, sille ei rakenneta rinnakkaistietä tai tilannetta ratkaista jotenkin muuten. Kun ongelmallisia liikennetilanteita lähdetään ratkaisemaan, kannattaa pitää mielessä, miten toimenpiteitä voidaan tulevaisuudessa kehittää tai järjestelmää laajentaa vastaamaan kulloisiakin tarpeita.

Esimerkiksi lievien tai satunnaisten liikenteen ongelmien ratkaisuun saattaa ensin riittää pelkkä tiedotus. Jos liikennemäärät kasvavat ja ongelmat tulevat vaikeammiksi, täytyy tiedotuksen lisäksi ottaa käyttöön varsinaisia liikenteen ohjaustoimenpiteitä. Alkuun riittänee yksinkertainen ohjauslogiikka, joka perustuu viimeisiin mittaustietoihin. Jos liikennemäärät yhä kasvavat ja ongelmat pahenevat entisestään, saattaa olla tarpeen ottaa käyttöön ennakoiva liikenteen ohjaus, jolloin liikenteen hallinta muuttuu reaktiivisesta proaktiiviseksi. Tällöin pyritään ennakoimaan ongelmat eikä vain tunnistamaan jo syntyneitä tilanteita.

2.2 Tarkasteltavat tietyytit ja niiden liikenteelliset ongelmat

Selvityksessä liikenteelliset ongelmat on jaettu neljään ryhmään ongelman aiheuttajan mukaan. Aiheuttajia ovat ylikysyntä, satunnaiset liikenteen häiriöt, poikkeuksellinen sää ja keli sekä tietyytit.

Ylikysynnän aiheuttamilla liikenteen ongelmilla tarkoitetaan ongelmia, joita syntyy, kun kysyntä ylittää tarjonnan. Tällöin liikennemäärä on tiellä erittäin suuri suhteessa välityskykyyn, keskimääräinen matkanopeus laskee ja pistenopeuksien varianssi kasvaa. Liikenne jonoutuu ja muuttuu erittäin häiriöherkäksi. Myös raskaiden ajoneuvojen suuri osuus voi johtaa edellä kuvatun kaltaisiin tilanteisiin, vaikkei kysyntä ylittäisikään tarjontaa.

Satunnaisilla liikenteen häiriöillä tarkoitetaan häiriöitä, joiden alkuperäinen syy ei ole liian suuri liikennemäärä, vaan esimerkiksi rikkoutunut ajoneuvo tai onnettomuus, joka tukkii osan tiestä ja näin aiheuttaa välityskyvyn alenemisen. Satunnaiset häiriöt ovat todellinen ongelma, sillä Yhdysvalloissa on arvioitu, että 20–50 prosenttia moottoriteiden onnettomuuksista tapahtuu (primäärysten) häiriöiden seurauksena. Yli 50 prosenttia sekundäärisistä onnettomuuksista tapahtuu 10 minuutin kuluessa primäärisen häiriön tapahtumisesta. Tästä alkaa usein onnettomuuksien sarja, joka voitaisiin välttää varoittamalla tienkäyttäjää ajoissa. Lisäksi Yhdysvalloissa on todettu, että satunnaiset häiriöt aiheuttavat kokonaisuudessaan enemmän viivytyksiä kuin ruuhkatuntien ylikysyntä (Busch 1991). Suomessa tilanne ei onneksi ole vielä näin paha.

Huono keli ja sää aiheuttavat liikenteelle ongelmia, jos autoilijat eivät pidä riittävän suurien turvavälejä ja laske nopeuttaan olosuhteiden vaatimalle tasolle. Huonolla kelillä ongelmia tuottaa usein se, että osa autoilijoista sopeuttaa ajokäyttäytymisensä olosuhteisiin, mutta osa ajaa olosuhteisiin nähden liian lujaa, mikä johtaa vaarallisiin ohituksiin ja suuriin nopeuseroihin. Myös tietyytit häiritsevät liikennettä.

Selvityksessä tarkastellaan kolmea eri tietyyppiä. Näistä ensimmäinen on kaupunkimoottoritie, jolla on tiheästi rampeja ja suuret liikennemäärät. Tiellä on työmatkaliikenteen vuoksi säännöllisesti ruuhkaa. Tielle löytyy vaihtoehtoisia reittejä. Vaihtoehtoiset reitit kuitenkin ruuhkautuvat helposti pahoin, jos suuri osa tienkäyttäjistä vaihtaa reittiään.

Kaupunkimoottoritiellä voi olla monia erilaisia liikenteellisiä ongelmia. Tärkein on varmasti liikenteen ruuhkautuminen ylikysynnän takia. Muita ongelmia ovat muun muassa satunnaiset liikenteen häiriöt, joukkoliikenteen sujuvuusongelmat, huono keli ja tietyöt. Moottoriteillä onnettomuusaste on melko alhainen, mutta suurten liikennemäärien vuoksi onnettomuudet voivat aiheuttaa merkittäviä häiriöitä sujuvuudelle (Tiehallinto 2001a).

Toinen tarkasteltava tietyyppi on taajamien ulkopuolinen moottoritie. Se eroaa edellä mainitusta kaupunkimoottoritiestä siten, että rampit ovat harvemmassa ja tiellä on vähemmän joukkoliikennettä. Ruuhkat painottuvat viikonloppuihin ja pyhäpäivien yhteyteen. Tiellä on usein alempiasteinen rinnakkaistie, jolle liikennettä voidaan häiriön sattuessa ohjata.

Taajamien ulkopuolisen moottoritien ongelmat ovat pitkälti samoja kuin kaupunkimoottoritien, vaikka ne rajoittuvatkin usein harvoin ajankohtiin. Tärkeimmät ongelmat lienevät huono keli ja satunnaiset liikenteen häiriöt.

Kolmas tarkasteltava tietyyppi on kaksikaistainen päätie, jolla liikenne joutuu ja jolla tehdään vaarallisia ohituksia. Ruuhkautumisen syynä voivat olla raskaan liikenteen suuri osuus tai suuret viikonloppuliikenteen liikennemäärät. Myös satunnaiset liikenteen häiriöt aiheuttavat suurella liikennemäärällä kaksikaistaisilla teillä huomattavia ongelmia. Sujuvuus- ja turvallisuusongelmat korostuvat etenkin moottoriteiden jatkeilla ja moottoriteiden välisillä osuuksilla (Tiehallinto 2001a). Kaksikaistaisilla teillä saattaa olla myös muun muassa tietöiden tai poikkeuksellisen sään ja kelin aiheuttamia liikenteellisiä ongelmia.

Kulmala & Luoma (2001a) ovat arvioineet, että Suomen yleisillä teillä yli 70 kilometrillä moottoriteitä (kaikki pääkaupunkiseudulla) ja reilulla 30 kilometrillä kaksikaistaisia teitä on päivittäisiä liikenteen määrästä johtuvia ongelmia (taulukko 1). Lisäksi noin 220 kilometrillä kaksikaistaisia teitä on liikenteen määrästä johtuvia kausittaisia ongelmia. Lähes kaikilla Suomen teillä on säästä ja kelistä aiheutuvia ongelmia. Suomen tieverkon nykyiset ongelmat ja Tiehallinnon päämäärien painottuminen kussakin toimintaympäristössä on esitelty taulukoissa 1 ja 2.

Taulukko 1. Nykyiset liikenteelliset ongelmat eri liikenteen hallinnan toimintaympäristöissä (Tiehallinto 2001a).

LIIKENTEELLISET ONGELMAT	Moottori- väylät	Päätiet, ongelma- osuudet	Päätiet, runko- verkko	Pääkau- punki- seutu	Suuret kaupunki- seudut	Muut tiet
Sujuvuusongelmia ajoittain	✓		✓			
Sujuvuusongelmia säännöllisesti		✓				
Sujuvuusongelmia päivittäin				✓	✓	
Keliongelmia ajoittain	✓		✓	✓	✓	
Keliongelmia päivittäin		✓				✓
Ympäristöongelmia ajoittain				✓	✓	
Turvallisuusongelmia	✓	✓	✓	✓	✓	
Saavutettavuusongelmia						✓

Taulukko 2. Tiehallinnon päämäärien painottuminen eri liikenteen hallinnan toimintaympäristössä (Tiehallinto 2001a).

TIEHALLINNON LIIKENTEEN HALLINNAN PÄÄMÄÄRÄT	Moottori- väylät	Päätiet, ongelma- osuudet	Päätiet, runko- verkko	Pää- kaupun- kiseutu	Suuret kaupun- kiseudut	Muut tiet
Turvallisuus	✓	✓	✓	✓	✓	
Varmuus ja sujuvuus	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Kysynnän tehokas hoitaminen				✓	✓	
Infrastruktuurin tehokas käyttö		✓		✓	✓	
Liikennemuotojen yhteistoiminta				✓	✓	
Kansalaisten liikkumismahdollisuus						✓
Ympäristö				✓	✓	
Tietoyhteiskunta	✓	✓	✓	✓	✓	✓

3 LIIKENTEEN OHJAUS- JA TIEDOTUSJÄRJESTELMILLE ASETETUT TAVOITTEET

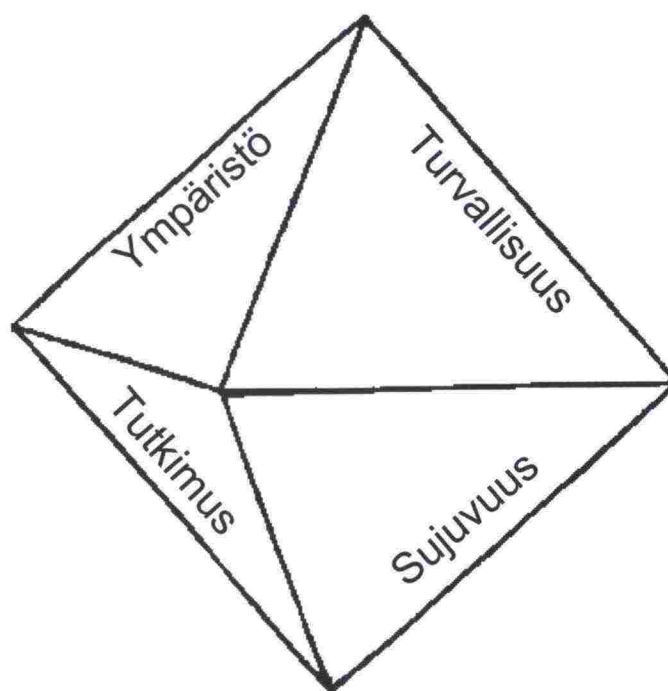
3.1 Tavoitteet

Liikenteen ohjausjärjestelmien tavoitteet liittyvät yleensä

- turvallisuuden
- välityskyvyn (sujuvuuden ja matka-ajan ennustettavuuden)
- energian kulutuksen ja/tai
- ympäristön saastumisen

parantamiseen.

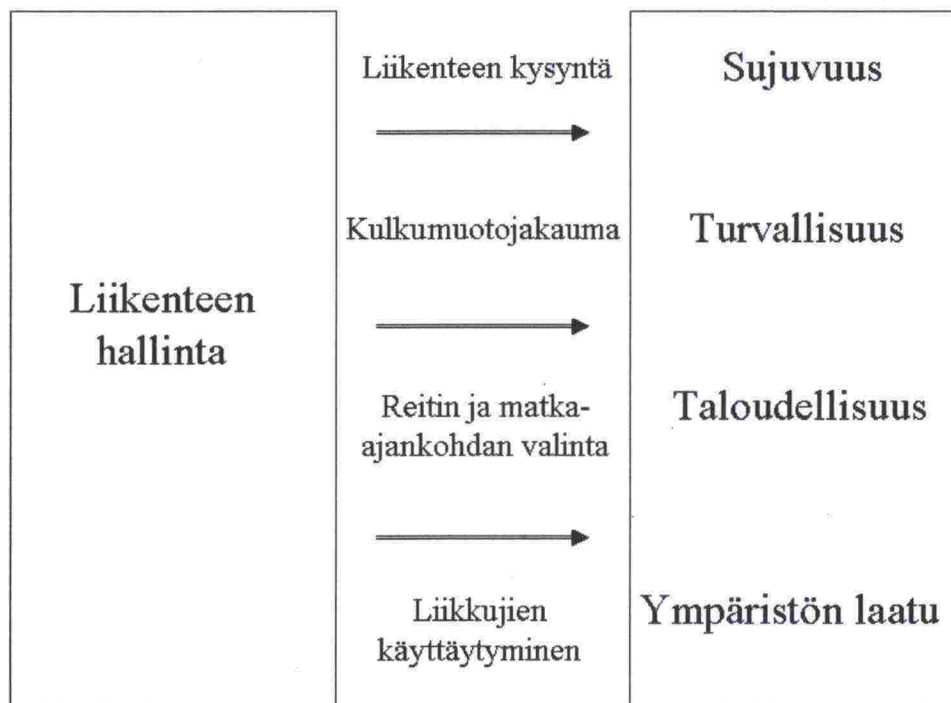
Prioriteetit riippuvat siitä, mitä tavoitteita halutaan painottaa (Klinjhout 1991). Esimerkiksi Tiehallinnossa on liikenteen hallinnan päätavoitteiksi asetettu liikenneturvallisuuden parantaminen sekä matkustamisen ja kuljetusten varmuuden ja sujuvuuden turvaaminen. Ydintoiminnoiksi onkin nimetty turvallisuuden, sujuvuuden ja kysynnän tehokkaan hoitamisen varmistavat toiminnot (Tiehallinto 2001a). Edellä mainittujen tavoitteiden lisäksi liikenteen ohjaus- ja tiedotusjärjestelmillä voi olla tienpidollisia ja tutkimuksellisia tavoitteita (kuva 4). Myös matka-ajan ennustettavuutta voidaan pitää tavoitteena.



Kuva 4. Liikenteen ohjaus- ja tiedotusjärjestelmien tavoitteet.

Turvallisuus- ja sujuvuustavoitteet ovat osin samoja, sillä sujuva liikennevirta on turvallinen ja häiriötön liikenne taas takaa sujuvuuden. Sujuva liikenne on usein myös ympäristöystävällistä (kuva 5). Tienpidon tavoitteet liittyvät kaikkiin edellä mainittuihin tavoitteisiin ja niiden lisäksi tienpitohenkilökunnan turvallisuuteen. Tutkimustavoitteet liittyvät esimerkiksi erilaisten järjestelmien

vaikutusten todentamiseen ja yllä mainittujen tavoitteiden saavuttamiseen. Tutkimustavoitteiden saavuttaminen edellyttää riittävien tietojen keräämistä tietokantoihin.



Kuva 5. Liikenteen hallinnan vaikutusmekanismi (Tiehallinto 2001a).

Toimenpiteitä, joiden tarkoituksena on parantaa sekä turvallisuutta että sujuvuutta, ovat muun muassa

- nopeuksien harmonisointi ja oikean nopeustason ylläpito
- häiriöiden hallinta ja häiriöistä tiedottaminen.

Tosin otettava huomioon, että vaikka alhainen nopeustaso on liikenteen kannalta turvallinen, se koetaan usein heikentävänä tekijänä sujuvuuden puolella.

Toimenpiteitä, joiden tarkoituksena on parantaa ennen kaikkea turvallisuutta, ovat muun muassa

- liikennekäyttäytymisen sopeuttaminen kelin vaatimuksiin sekä kelistä tiedottaminen
- turvavälien ylläpidon valvonta
- turhien ohitusten ehkäiseminen.

Sujuvuuteen liittyviä tavoitteita on muun muassa seuraavilla toimenpiteillä

- joukkoliikenne-etuisuudet
- ylikysyntätilanteiden hallinta.

Tutkimukselliset tavoitteet riippuvat tilanteesta, mutta yleisesti voidaan luetella muun muassa riittävän kattava liikenteen ja muiden asiaan liittyvien seikkojen seuranta sekä aineiston kokoaminen ja tallentaminen. Riittävän kattava tietokanta, johon on koottu yksityiskohtaiset tiedot liikennevirrasta, ohjauksesta ja kelistä, on edellytys sille, että järjestelmien vaikutukset saadaan selvitettyä ja uusia ohjauskonsepteja päästään kehittämään ja kokeilemaan.

3.2 Sujuvuuteen vaikuttavat tekijät

Suuri osa liikenteen ohjaus- ja tiedotusjärjestelmien tavoitteista liittyy joko liikenteen sujuvuuden tai turvallisuuden parantamiseen ja ylläpitoon. Sujuvuuteen liittyvät olennaisesti objektiivisuuden ja subjektiivisuuden käsitteet. Objektiivisella sujuvuudella tarkoitetaan sujuvuutta, jota voidaan mitata tarkkailemalla liikennevirtaa tai yksittäisiä ajoneuvoja. Subjektiivinen sujuvuus on tienpitäjän tai tienkäyttäjän tulkinta liikenteen sujuvuudesta (Luoma 1998). Liikenteen objektiivista sujuvuutta voidaan mitata esimerkiksi matka-ajan avulla ja subjektiivista sujuvuutta muun muassa palvelutasolla. Kaksikaistaisilla teillä yksi sekä sujuvuuteen että turvallisuuteen liittyvä mitta on ohitusten määrä.

Sujuvuuteen vaikuttavat tekijät voidaan jakaa kolmeen alaryhmään: väylä-, liikenne- ja muihin tekijöihin. Tässä selvityksessä keskitytään väylätekijöistä ainoastaan liikenteen ohjaukseen. Liikennetekijöitä ovat liikennemäärä, erilaiset liikenteen häiriöt, raskaan liikenteen osuus ja liikenteen vaihtelumuodot. Muilla tekijöillä tarkoitetaan edellä mainittuihin ryhmiin selvästi kuulumattomia tekijöitä, kuten keliä ja säätä tai liikennetiedottamista. (Luoma 1998.)

Nopeusrajoitukset voivat vaikuttaa sujuvuuteen varsinkin, jos tielle on asetettu tien geometriaan verrattuna liian alhainen nopeusrajoitus tai jos nopeusrajoitukset vaihtelevat usein saman tiejakson sisällä aiheuttaen liikennevirtaan kiihdytyksiä ja hidastuksia. Sujuvuutta voidaan parantaa harmonisoidulla liikennevirtaa muuttuvien nopeusrajoitusten avulla lähinnä korkealuokkaisilla väylillä. (Luoma 1998.)

Liikennemäärä vaikuttaa sujuvuuteen ja sen kokemiseen, koska kuljettajat ajavat mieluummin vapaasti omissa oloissaan kuin muiden ajoneuvojen pakottamina ruuhkautuneessa liikennevirrassa. Satunnaiset liikenteen häiriöt alentavat välityskykyä ja aiheuttavat tästä syystä liikenteelle odottamattomia viivytyksiä. Viivytykset kasvavat eksponentiaalisesti häiriön poistamiseen kuluvan ajan suhteen. Häiriötiedottaminen on tärkeää, sillä häiriön vaikutus liikenteen sujuvuuden kokemiseen on pienempi, jos siihen on osattu varautua etukäteen. (Luoma 1998.)

Kelin vaikutus tieliikenteen sujuvuuteen ilmenee muun muassa ajonopeuksien muutoksina. Liikennetiedotuksessa liikennejärjestelmän ylläpitäjän tavoitteena on ohjauksen tehostaminen, kuormitushuippujen tasoittaminen, järjestelmän häiriötilanteiden ja riskien välttäminen sekä sitä kautta tienkäyttäjien tyytyväisyys. (Luoma 1998.)

Tiehallinnon liikennetilannetiedotuksessa liikennetilannetta kuvataan liikennevirran keskinopeuden ja vapaan virran keskinopeuden suhteen avulla. Luokitus on esitetty taulukossa 3. (Tiehallinto 2001b.)

Taulukko 3. Liikennetilanneluokitus mitatun keskinopeuden ja vapaan virran keskinopeuden suhteen perusteella (Tiehallinto 2001b).

Liikennetilanneluokitus	Määrittäminen / sisältö
Liikenne sujuvaa	Liikennevirran keskinopeus on vähintään 90 % vapaan virran keskinopeudesta.
Liikenne jonoutunut	Liikennevirran keskinopeus on 75–90 % vapaan virran keskinopeudesta.
Liikenne hidasta	Liikennevirran keskinopeus on 25–75 % vapaan virran keskinopeudesta.
Liikenne pysähtelee	Liikennevirran keskinopeus on 10–25 % vapaan virran keskinopeudesta.
Liikenne seisoo	Liikennevirran keskinopeus on alle 10 % vapaan virran keskinopeudesta.

Moottoriteiden palvelutaso määritetään HCM 2000:ssa liikennetiheyden perusteella. Käytännössä liikennetiheys määritetään huippuliikennemäärän ja henkilöautojen keskinopeuden osamääränä. Huippuliikennemäärä taas määritetään mitatun liikennemäärän, huipputuntikertoimen, kaistojen lukumäärän, raskaiden ajoneuvojen osuuden ja sen perusteella, kuinka hyvin kuljettajat tuntevat tien. Raskaille ajoneuvoille on mäkiseen maastoon omat henkilöautovastaavuuskertoimensa. Henkilöautojen keskinopeus määritetään huippuliikennemäärän ja vapaan virran nopeuden perusteella. Vapaan liikennevirran nopeuteen vaikuttavat kaistan ja pientareen leveys, kaistojen lukumäärä sekä liittymätiheys. (HCM 2000.)

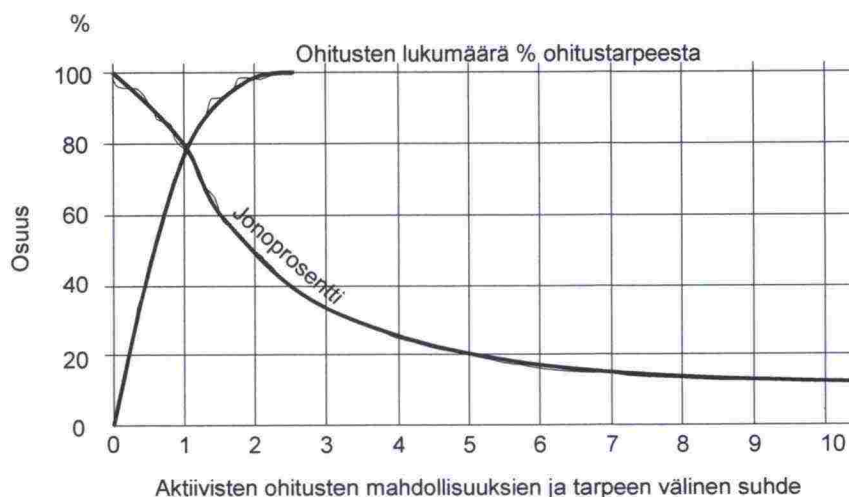
Kaksikaistaisilla pääteillä liikenteen palvelutaso määritellään viivytysprosentin ja keskimääräisen matkanopeuden funktiona. Viivytysprosentilla tarkoitetaan sitä osaa ajasta, jonka ajoneuvo joutuu seuraamaan toista ajoneuvoa, eli ei voi ajaa vapaasti. Keskimääräinen matkanopeus määritellään vapaan virran nopeuden, välityskyvyn ja ohituskieltoalueiden määrän perusteella. Vapaan virran nopeuteen vaikuttavat raskaiden ajoneuvojen osuus, kaistan ja pientareen leveydet sekä liittymätiheys. Huippuliikennemäärään vaikuttavat mitatun liikennemäärän ja huipputuntikertoimen lisäksi maasto ja raskaiden ajoneuvojen määrä. Viivytysprosenttiin vaikuttavat muun muassa liikenteen suuntajakauma ja ohituskieltoalueiden osuus. (HCM 2000.)

Yllä esitetyistä HCM 2000:n mukaan palvelutasoon vaikuttavista tekijöistä esimerkiksi tiegeometria muuttuu tieosasta toiseen, mutta pysyy yksittäisessä kohteessa samana ajankohdasta toiseen. Tärkeimmät palvelutasoon liittyvät tekijät, jotka muuttuvat ajan funktiona hetkestä toiseen, ovat liikennemäärä, keskinopeus ja raskaiden ajoneuvojen osuus. Näistä keskinopeus ja liikennemäärä ovat niitä, joihin voidaan ainakin jossain määrin vaikuttaa.

Jonoissa ajavien ajoneuvojen osuus ja tehtyjen ohitusten määrä ovat seurausta ohitustarpeesta ja -mahdollisuuksista liikennevirrassa. Ohitustarve johtuu ajoneuvojen välisistä nopeuseroista. Ohitustarve voidaan laskea joko yksittäiselle ajoneuvolle tai koko liikennevirralle yhteensä nopeusjakauman ja liikennemäärän avulla. Ohitusmahdollisuuksien määrän estimaatit perustuvat vastaantulevan liikenteen aikavälijakaumaan ja ohituksiin tarvittaviin aikoihin. (Pursula & Innamaa 2001.)

Kallberg (1980) sai simulointiin perustuvan tutkimuksen avulla selville, että kun ohitustarve on yhtä suuri kuin ohitusmahdollisuuksien määrä, tarvittava ohitusten määrästä suoritetaan 80 prosenttia ja jonoprosentti on 80 (kuva 6).

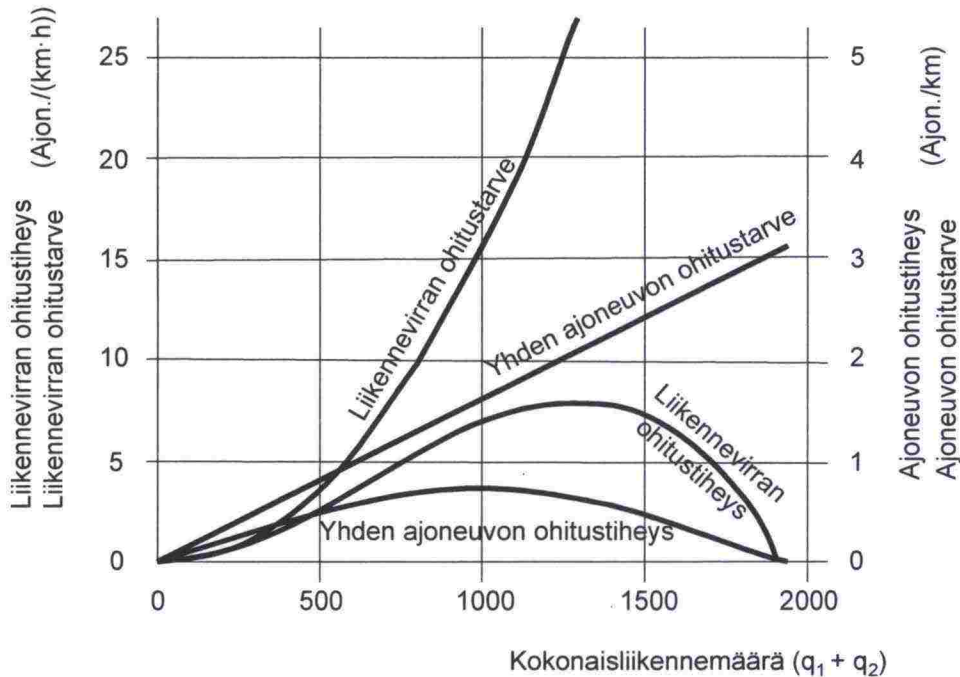
Kun ohitusmahdollisuuksien määrä on kolminkertainen ohitustarpeeseen nähden, kaikki tarvittavat ohitukset voidaan tehdä ja jonoprosentti on 33.



Kuva 6. Jonoprosentin ja ohitusten määrän välinen yhteys haluttujen ohitusten määrän funktiona (Kallberg 1980).

Kun liikennemäärä kasvaa tai tiegeometria huononee, ohitustarve kasvaa ja ohitusmahdollisuuksien määrä vähenee. Tämä johtaa siihen, ettei kaikkia ohituksia voida enää tehdä. Tämä johtaa keskinopeuden ja nopeuden hajonnan laskuun. Ohitustiheydellä onkin selkeä yhteys nopeusjakauman ja tieolosuhteiden kanssa. (Kallberg 1980.)

Koko liikevirran ohitustarve kasvaa suhteessa liikennemäärän neliöön ja yksittäisen ajoneuvon ohitustarve suhteessa liikennemäärään. Kun liikennemäärä kasvaa, yhä pienempi osuus ohituksista voidaan suorittaa (kuva 7). Ohitustiheys laskeekin, kun koko liikennevirran ja yksittäisen ajoneuvon ohitustarpeet kasvavat kokonaisliikennemäärä kasvaessa. (Normann 1942.)



Kuva 7. Koko liikennevirran ja yksittäisen ajoneuvon teoreettinen ja havaittu ohitustiheys tilanteessa, jossa 2/3 liikenteestä ajaa vastakkaiseen suuntaan (Normann 1942).

Koko liikennevirran ohitustiheys on riippuvainen nopeusjakaumasta. Ohitustiheys on suoraan verrannollinen nopeusjakauman hajontaan ja kääntäen verrannollinen matkajakauman keskinopeuteen. Jos nopeusjakauma oletetaan normaaliksi, ohitustarpeen T yhtälö on seuraavanlainen.

$$T = \frac{q^2 \sigma_s}{\sqrt{\pi} \bar{v}_s^2} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot k^2 \sigma_s$$

Yhtälössä q on liikennemäärä ja k liikennetiheys, σ_s on nopeusjakauman hajonta ja \bar{v}_s matkajakauman keskinopeus. (Pursula & Innamaa 2001.)

3.3 Turvallisuuteen vaikuttavat tekijät

Useat tutkimukset ovat osoittaneet, että matalampi nopeus johtaa vähempiin onnettomuuksiin ja vastaavasti korkeampi nopeus kasvattaa onnettomuusriskiä (Salusjärvi 1980, Liikenneministeriö ym. 1992). Onnettomuusriskin muutoksen suuruus vaihtelee eri tutkimuksissa. Ranta (1997) sovitti lineaarisen regressiomallin aineistoon, jossa yksittäisiä tutkimustuloksia painotettiin varianssin käänteisarvolla. Mallin mukaan keskinopeuden 1 km/h lasku vähentää henkilövahinko-onnettomuuksien määrää 2,5 prosenttia ja keskinopeuden 1 km/h nousu kasvattaa näiden määrää 3,7 prosenttia. Nopeus ei vaikuta ainoastaan onnettomuusriskiin, vaan myös seurauksien vakavuuteen (Ranta 1997).

Myös nopeuden hajonnan on osoitettu vaikuttavan onnettomuusriskiin. Ei ole varmaa, onko nopeuden hajonnan ja onnettomuuksien vakavuuden välillä vastaavanlaista riippuvaisuutta kuin keskinopeuden ja vakavuuden välillä on. (Ranta 1997.)

Onnettomuusriski on yleensä U-muotoinen ajonopeuden funktio. Onnettomuusriski on pienimmillään liikennevirran keskinopeuden läheisyydessä ja suurimmillaan hyvin alhaisilla ja korkeilla nopeuksilla. Nopeuksien hajonnan lisäksi myös nopeusjakauman vinous vaikuttaa riskiin. (Ranta 1997.)

Nopeuksien suuri hajonta voi vaikuttaa liikennevirran ominaisuuksiin myös siten, että virta tulee nopeuksien osalta heterogeeniseksi eikä liikenne enää suju. Sujuvassa virrassa yksittäisten ajoneuvojen nopeuksien varianssi on pienimmillään. Kun ajoneuvojen väliset nopeuserot kasvavat, hitaimmat ajoneuvot keräävät taakseen ajoneuvoja, joilla on suurempi tavoitenopeus. Nämä nopeammat ajoneuvot yrittävät ohittaa hitaan ajoneuvot, mikä aiheuttaa kiihdytyksiä ja jarrutuksia ja näiden seurauksena vaarallisia tilanteita. (Luoma 1998.)

4 LIIKENTEEN OHJAUS

4.1 Liikenteen ongelmien seuraukset ja mittarit

On parempi estää ylikysynnästä johtuva ruuhkautuminen kuin yrittää purkaa jo syntynyt ruuhka. Eräs tehokas keino tähän moottoriteillä on ramppiohjaus. Toinen menetelmä on vaimentaa ruuhkan aiheuttamia shokkiaaltoja alentamalla nopeutta. Alennetuilla nopeusrajoituksilla voidaan päästä 5 prosenttia korkeampaan välityskykyyn kuin muuten (Klinjhout 1991). Ylikysynnän aiheuttamat ongelmat ilmenevät moottoriteillä

- matkanopeuksien laskuna
- pistenopeuksien suurena vaihteluna
- pienten aikavälien osuuden kasvuna
- suurena liikennetiheytenä ja varausasteena
- jonossa ajavien ajoneuvojen suurena osuutena.

Kaksikaistaisilla teillä ylikysynnän aiheuttamat ongelmat ilmenevät usein edellä mainittujen liikennevirran ominaisuuksien lisäksi myös ohitusten määrän voimakkaana laskuna.

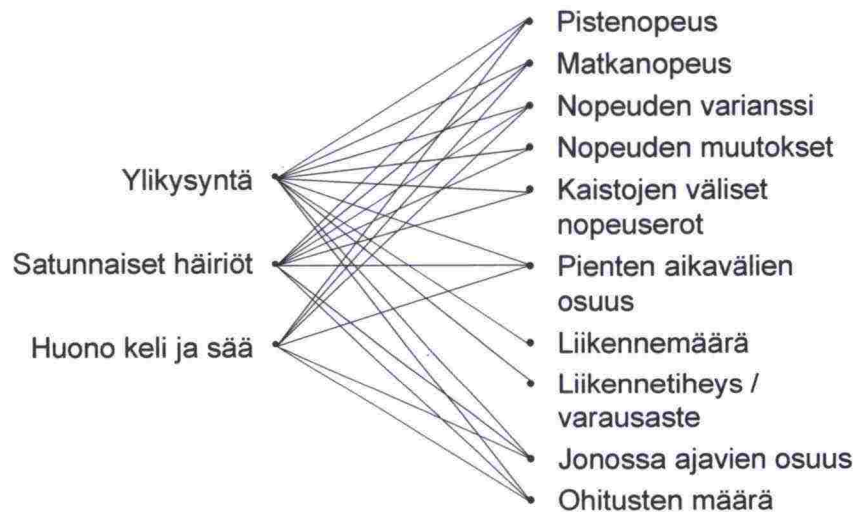
Satunnaiset häiriöt aiheuttavat liikenteellisiä ongelmia alentamalla tien välityskykyä. Alentunut välityskyky johtaa paikalliseen ylikysyntään. Satunnaisen liikenteen häiriöiden aiheuttamat ongelmat ilmenevät

- suurina ja äkillisinä nopeuden muutoksina
- suurina kaistojen välisinä nopeuseroina
- liikennetiheyden paikallisina eroina
- paikallisena jonoutumisena
- kaksikaistaisilla teillä ohitusten määrän paikallisena muutoksena.

Huonon kelin ja sään aiheuttamat liikenteen ongelmat ilmenevät muun muassa

- liian suurina tilannenopeuksina
- suurena nopeuden varianssina
- pienten aikavälien suurena osuutena
- vaarallisina ohituksina.

Kuvassa 8 on esitetty yhteenveto suureista, joiden avulla erilaiset liikenteelliset ongelmat voidaan havaita. Joukkoliikenteen sujuvuusongelmia voidaan mitata esimerkiksi joukkoliikenteen matka-ajan avulla. Kelin ja sään mittamiseen täytyy käyttää erityisiä tiesääasemia tai tarkoitukseen suunniteltuja anturiajoneuvoja, jotka kykenevät mittaamaan tienpinnan ja ilman lämpötilaa, kitkaa, näkyvyyttä ja niin edelleen.



Kuva 8. Poikkeuksellisten liikennetilanteiden aiheuttajat ja suureet, joita mittamalla tilanne voidaan tunnistaa.

4.2 Poikkeuksellisten liikennetilanteiden hallinnan tavoitteita

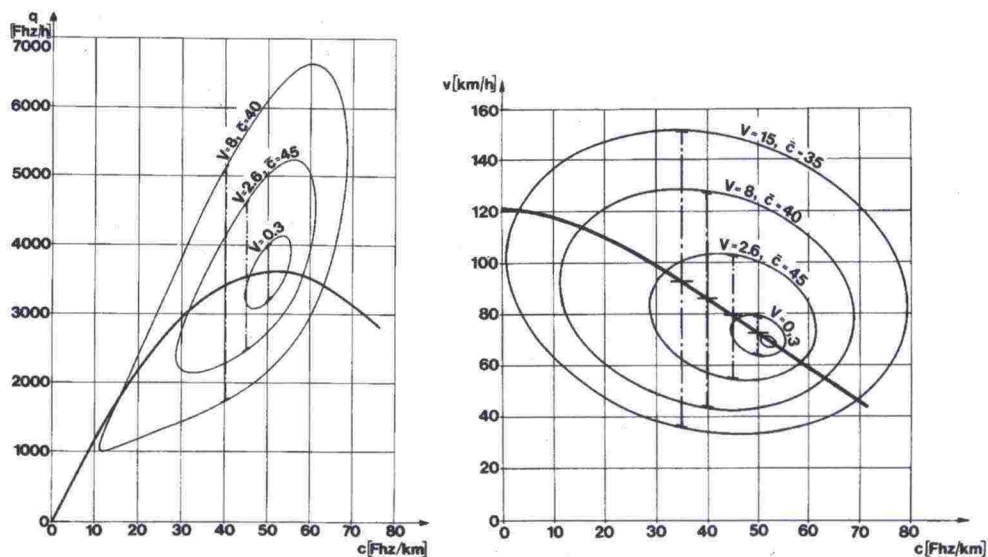
Ylikysynnän aiheuttamien liikenneongelmien hallinnan tavoitteet voidaan jakaa turvallisuus- ja sujuvuustavoitteisiin. Liikenteen turvallisuuden parantamiseksi halutaan harmonisoida nopeuksia sekä vähentää lyhyitä aikavälejä ja vaarallisten ohitusten määrää. Liikennevirta, jossa nopeuksien hajonta ja kaistojen välinen nopeusero ovat suuria, on häiriöherkempi kuin tasainen virta.

Nopeustason säätäminen ei suoranaisesti paranna sujuvuutta. Kun nopeustasoa lasketaan, liikennetiheys kasvaa olettaen, ettei nopeustason lasku vaikuta liikennemäärään. Mitataan sujuvuutta sitten nopeudella tai ajomukavuudella ja -vapaudella, niin sujuvuus huononee nopeusrajoituksen laskiessa. Subjektiivista sujuvuutta nopeusrajoituksen alentaminen saattaa kuitenkin parantaa laskemalla tienkäyttäjien tavoitenopeuksia. Alennettu nopeusrajoitus saattaa parantaa sujuvuutta myös epäsuorasti, jos se johtaa pienempään nopeuden hajontaan ja sitä kautta vähemmän häiriöherkkään liikennevirtaan.

Ylikysyntätilanteiden ehkäiseminen on tärkeää, sillä jo syntyneen ruuhkan purkamiseen vaadittava liikennemäärän lasku tai välityskyvyn kasvu on suurempia kuin ruuhkan aiheuttanut liikennemäärän kasvu tai välityskyvyn lasku. Lisäksi esimerkiksi keskinopeus ei muutu lineaarisesti liikennemäärän mukana, vaan nopeus pysyy pitkään suunnilleen samalla tasolla ja laskee voimakkaasti tietyn liikennemäärän jälkeen. Jos liikennemäärä saadaan pidettyä pienempänä kuin edellä kuvattua voimakasta laskua vastaava liikennemäärä, ongelmia ei synny.

Samaan viittaa myös Cremerin (1979) tekemä liikennevirran häiriöherkkyyksianalyysi (kuva 9). Sen mukaan liikennevirta kestää sitä pienempiä häiriöitä mitä lähempänä kriittistä liikennetiheyttä ollaan. Pienillä liikennetiheyksillä hetkellinen häiriö, jossa liikennetiheys nousee huomattavastikin kriittistä lii

kennetiheyttä suuremmaksi, purkautuu itsekseen, kun taas kriittisen liikennetiheyden ympäristössä jo pieni poikkeama johtaa vaikeuksiin. Järjestelmät tulisi siis mitoittaa siten, että kullekin tieosalle jäisi riittävä häiriöiden sietokyky.



Kuva 9. Liikennevirran häiriöherkkyys. Liikennevirta toipuu itsekseen alueiden sisäpuolella olevista häiriöistä (Cremer 1979).

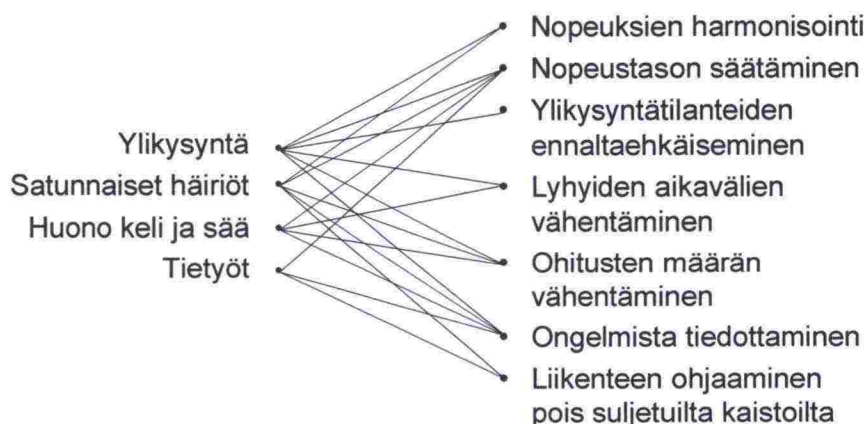
Tavoitteet, joiden avulla satunnaisten liikenteen häiriöiden aiheuttamia ongelmia yritetään ratkaista, liittyvät pääasiassa turvallisuuteen. Nopeustaso halutaan säätää sellaiseksi, ettei muutos tule yllätyksenä eikä häiriökohdasta ylävirtaan etenevä shokkiaalto aiheuta liian voimakkaita muutoksia liikennevirtaan ja johda näin sekundäärisiin ongelmiin ja vaaratilanteisiin. Sama on tietenkin tärkeää myös toistuvien ylikysyntätilanteiden tapauksessa.

Liikenteen ohjaaminen ajoissa pois suljetulta kaistalta parantaa häiriön poistamisen parissa työskentelevien ihmisten turvallisuutta, mutta pienentää myös sekundääristen onnettomuuksien riskiä, kun tarvittavat kaistanvaihdot voidaan tehdä ajoissa ja rauhassa. Tienkäyttäjät pyritään sopeuttamaan tilanteeseen tiedotuksen avulla ja samalla yritetään ehkäistä vaarallisia ohituksia.

Myös huonoon keliin ja säähän tai tietöihin ja muihin huoltotoimenpiteisiin liittyvät tavoitteet ovat pääasiassa turvallisuustavoitteita. Huonolla kelillä nopeustaso pyritään saattamaan olosuhteisiin nähden oikeaksi ja nopeuseroja pyritään pienentämään. Lyhyiden aikavälien osuutta ja vaarallisten ohitusten määrää pyritään vähentämään onnettomuusriskin pienentämiseksi. Tietöiden yhteydessä liikennevirran nopeuden taso pyritään säätämään tietyöpaikalla työskentelevien ihmisten kannalta turvalliseksi ja liikenne ohjataan ajoissa pois suljetulta kaistalta. Poikkeuksellisista olosuhteista tiedottamalla saadaan tienkäyttäjät ymmärtämään ja hyväksymään paremmin esimerkiksi alennetun nopeusrajoituksen syy.

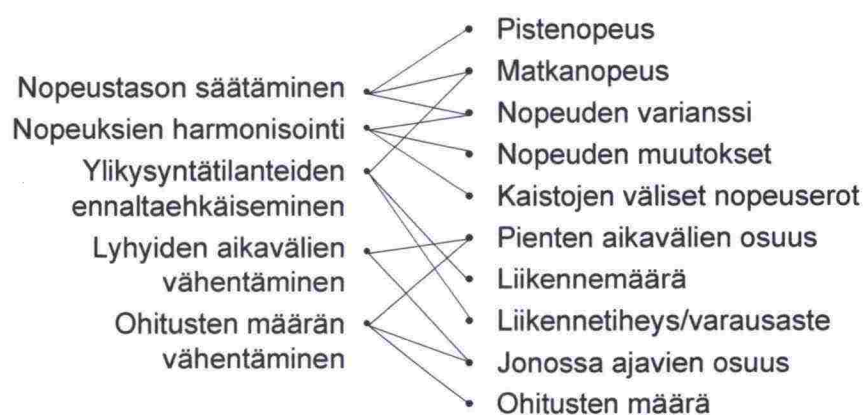
Eri syistä aiheutuvat liikenteen ongelmat voidaan usein ratkaista eriasteisten tavoitteiden avulla (kuva 10). Kuten kuvasta 10 havaitaan, yksittäisen ongelman ratkaisemiseksi voidaan asettaa useita eri tavoitteita ja yksittäinen

tavoite voi helpottaa useampaa eri ongelmaa. Tästä on hyvänä esimerkkinä nopeustason säätäminen, joka on tavoitteena kaikilla eri syistä aiheutuvilla liikenteen ongelmilla.



Kuva 10. Poikkeuksellisten liikennetilanteiden aiheuttajat ja tavoitteita, jotka saavuttamalla ongelmia voidaan helpottaa.

Kuvassa 8 esitettiin poikkeuksellisten liikennetilanteiden aiheuttamia ongelmia ja suureita, joilla ne voidaan mitata, ja kuvassa 10 vastaavasti osatavoitteet, joiden avulla ongelmia voidaan yrittää ratkaista. Kuvassa 11 on puolestaan yhdistetty erilaiset liikenteen ongelmien ratkaisemiseksi asetetut tavoitteet ja suureet, joilla niiden toteutumista voidaan mitata. Vaarallisten ohitusten määrän vähentäminen on tavoitteena erityisesti kaksikaistaisilla teillä. Moottoriteillä, joilla liikenne on suunnittain erotettu, ohitukset eivät tuota vastaavaa ongelmaa. Lyhyet aikavälit sitä vastoin ovat molempien tietyyppien ongelma.



Kuva 11. Poikkeuksellisten liikennetilanteiden aiheuttamien ongelmien ratkaisun tavoitteita ja suureita, joilla niiden toteutumista voidaan mitata.

4.3 Liikenteen ohjauksen ja tiedotuksen vaikutukset liikennevirtaan

Liitteessä A on esitetty tutkimustuloksia liikenteen ohjauksen ja tiedotuksen vaikutuksista liikennevirtaan. Taulukkoon 4 on koottu yhteenveto erilaisten ohjaustoimenpiteiden ja tiedotuksen sekä ulkoisten olosuhteiden vaikutuksista. Ulkomaiset tulokset olivat samansuuntaisia kuin suomalaiset.

Taulukko 4. Erilaisten tekijöiden vaikutuksia liikennevirtaan.

Rajoitus 100 km/h vs. 80 km/h	<ul style="list-style-type: none"> Nopeus 4 - 10 km/h korkeampi Enemmän suuria nopeuden muutoksia Nopeuksien hajonta suurempi (tosin liian alhainen rajoitus kasvattaa nopeushajontaa)
Suuri vs. pieni liikennemäärä	<ul style="list-style-type: none"> Vähemmän suuria nopeuden muutoksia
Huono vs. hyvä keli	<ul style="list-style-type: none"> Keskinopeus alhaisempi Nopeusrajoituksen vaikutus pienempi (2 km/h) Nopeuksien hajonta suurempi
Liukas ajorata –merkki vs. ei merkkiä	<ul style="list-style-type: none"> Nopeudet alhaisempia (noin 2 km/h) Viikkuvana alentaa enemmän nopeuksia ja vaikutus kestää pidempään kuin kiinteästi valaistuna
Muuttuva turvaväli –opaste vs. ei opastetta	<ul style="list-style-type: none"> Pienien aikavälien osuus saattaa olla pienempi Keskinopeus alhaisempi (1 km/h)
Ruuhkavaroitus	<ul style="list-style-type: none"> Reittiopastuksen yhteydessä saa osan autoilijoista vaihtamaan reittiään Ruuhkattomassa liikenteessä nostaa hieman nopeutta

Tarkastellaan taulukkoa toisin päin. Ulkoisista tekijöistä liikennevirran keskinopeuteen vaikuttavat sekä liikenteen määrä ja laatu että keli ja sää. Liikenteen hallinnallisia keinoja vaikuttaa keskinopeuteen ovat nopeusrajoitus- ja varoitusmerkit. Kun keli on selvästi huono (autoilija havaitsee sen itsekin), liikenteen ohjauksen vaikutukset ovat vähäisempiä kuin sellaisella huonolla kelillä, jota on vaikea havaita (Rämä 1997).

Nopeuden hajonta on voimakkaasti riippuvainen liikennemäärästä ja kelistä. Suuri liikennemäärä pienentää jo itsessään nopeuksien hajontaa ja vähentää suurien nopeuden muutosten määrää, koska vapaiden ajoneuvojen osuus on pieni. Huono keli lisää nopeuksien hajontaa. Muuttuvalla nopeusrajoituksella 100 km/h on raportoitu suurempia nopeuden keskihajontoja kuin nopeusrajoituksella 80 km/h (Rämä 1997). On kuitenkin viitteitä siihen suuntaan, että olosuhteisiin nähden ”liian” alhainen nopeusrajoitus kasvattaa nopeuskeskihajontaa (Innamaa ym. 2000, Schirokoff ym. 2000, Hautala ym. 2001).

Monet tulokset siis viittaavat siihen, että olosuhteisiin nähden oikeanlaisella ohjauksella saadaan aikaan haluttuja tuloksia: voidaan säätää keskinopeuden tasoa ja pienentää nopeuskeskihajontaa. Autoilijan subjektiivisen näkemys mukaan liian alhaiset nopeusrajoitukset ja ”aiheettomat” varoitukset saattavat kuitenkin saada aikaan päinvastaisia tuloksia, kuten nopeuskeskihajonnan kasvua. Toinen esimerkki on Länsiväylältä (Innamaa ym. 2000), jossa ruuhkattomassa liikenteessä näytetty jonovaroitus sai autoilijat ajamaan lujempaa kuin vastaavalla nopeusrajoituksella samoissa olosuhteissa

muuten. Tulokset viittaavat siihen, ettei "turha" varovaisuus kannata liikenteen ohjauksessa, vaan sillä saatetaan jopa tehdä liikennevirrasta häiriöherkempi kuin se muutoin olisi.

Parasta ohjausta ja liikenteen tiedotusta kuvaavat siis sanat ajantasainen ja tilanteeseen sopiva. Tällä tarkoitetaan sitä, ettei toimenpiteillä saa ennakoida liikaa tulevaa, mutta ohjaus täytyy pitää koko ajan tilanteen tasalla. Turha ennakointi tai jälkijättöisyys näkyy liikennevirrassa ei-toivottuina ominaisuuksina.

4.4 Ohjaustavan valinta

Kaupunkimoottoritien ongelmien ratkaisuun voidaan käyttää seuraavanlaisia järjestelmiä:

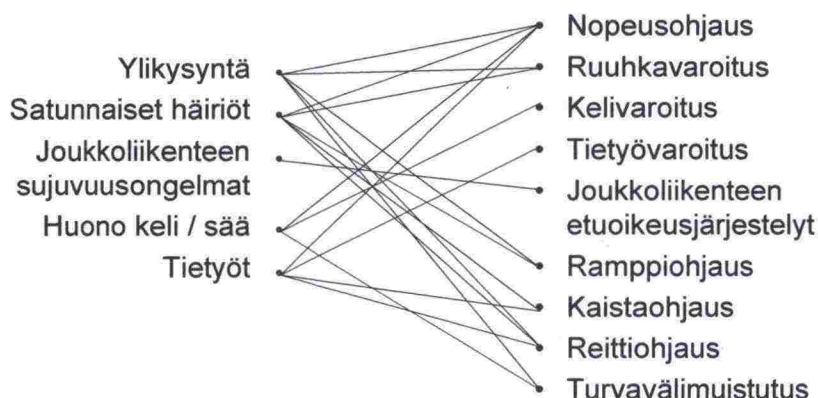
- nopeusohjaus
- ruuhkavaroitus
- matka-aikatiedotus
- kelivaroitus
- joukkoliikenteen etuoikeusjärjestelyt
- ramppiohjaus
- kaistaohjaus
- reittiohjaus (tosin usein ainoastaan rajoitetusti).

Taajamien ulkopuolisella moottoritillä lista on muuten samanlainen, mutta joukkoliikenteen etuoikeusjärjestelyihin ei yleensä ole tarvetta ja reittiohjauksen käyttö on rinnakkaistien ansiosta vartenotettava vaihtoehto.

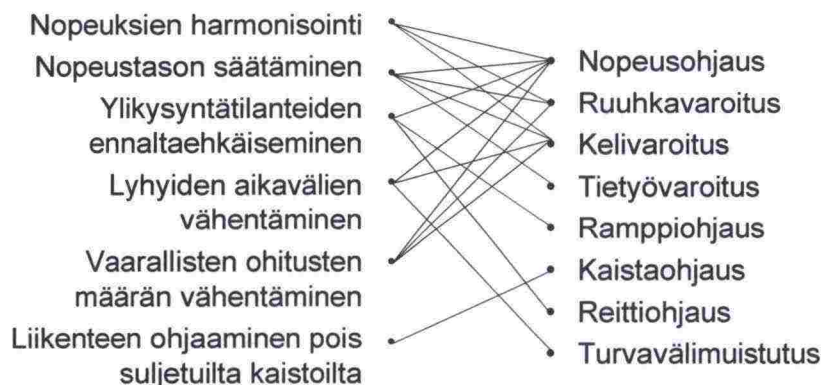
Kaksikaistaisella päätiellä ongelmien ratkaisuun käytettäviä järjestelmiä ovat

- nopeusohjaus
- jonovaroitus / häiriöiden havainnointi
- matka-aikatiedotus
- kelivaroitus
- tietyövaroitus
- reittiohjaus
- virtuaaliset ohituskaistat
- turvavälimuistutus.

Kuvassa 12 on esitetty keinoja erilaisten liikenteellisten ongelmien ratkaisuun. Kuvassa mainituista keinoista ramppi- ja kaistaohjausta ei voida soveltaa kaksikaistaisilla teillä. Kuvassa 13 keinot on yhdistetty erilaisiin liikenteen ongelmien ratkaisuun asetettuihin tavoitteisiin.



Kuva 12. Pääteiden liikenteellisiä ongelmia ja keinoja niiden ratkaisemiseen.



Kuva 13. Pääteiden liikenteellisten ongelmien ratkaisuun asetettuja tavoitteita ja keinoja niiden saavuttamiseksi.

Käydään esimerkin vuoksi läpi muuttuviin opasteisiin perustuvan reittiohjausjärjestelmän laatiminen (Balz & Zackor 1991). Dynaamisen reittiohjausjärjestelmän rakentamiseen tarvitaan ensinnäkin laadukasta aineistoa ja toiseksi huolellista analysointia sekä mahdollisesti nykyisten mittausarvojen ennustamista. Ohjausalgoritmin ytimenä on yleensä tavoitefunktio, joka kykenee arvioimaan vaihtoehtoisia ohjaustiloja. Ohjausmalli jakautuu neljään elementtiin:

- 1) *Perusaineisto.* Tieverkkotietokannan avulla ohjattava alue jaetaan ulkoisilta ja liikenteellisiltä ominaisuuksiltaan yhtenäisiin osiin. Tieosien rajat sijoitetaan usein liittymiin tai tien muutoskohtiin. Odotettavissa olevien liikennemäärien avulla voidaan optimoida esimerkiksi reititopastusjärjestelmän toimintaa. Yksinkertaisimmillaan liikennemääräestimaatit perustuvat kyseisen päivätyypin historiakeskiarvoihin. Sen lisäksi, että arvioidaan, kuinka nykyinen liikenne käyttäytyy kullakin ohjausvaihtoehdolla, on arvioitava kunkin ohjausvaihtoehdon vaikutuksia liikennemääriin ja sitä, kuinka suuri osa tienkäyttäjistä toimii muutuvien opasteiden viestin tarkoittamalla tavalla. Ohjausvaihtoehtojen seurauksena olevat muutokset liikenneolosuhteissa arvioidaan usein liikennevirran peruskuvaajan avulla.

- 2) *Liikenneolosuhteiden analysointi.* Tämän hetkiset liikenneolosuhteet tieverkolla analysoidaan huolellisesti. Tavoitteena on arvioida nykyiset matka-ajat olemassa olevilla vaihtoehtoisilla reiteillä ja tehdä matka-aikojen vertailua. Tämä voidaan tehdä joko linkille menevien ja sieltä poistuvien liikennemäärien avulla estimoitujen liikennetiheyksien, suorien pistenopeusmittausten tai liikennemäärän perusteella liikennevirran peruskuvaajalta estimoitujen matkanopeuksien avulla.
- 3) *Liikenneolosuhteiden ennustaminen.* Muuttuviin opasteisiin perustuvan liikenteen ohjausjärjestelmän vaikein osa on liikennetilanne-ennusteiden tekeminen. Se on kuitenkin perusta tavoitesuureiden arvojen määrittämiselle ja näin ollen eri ohjausvaihtoehtojen väliselle arvioinnille. Ensinnäkin on ennustettava, kuinka nykyinen liikennetilanne kehittyy, ja toiseksi, kuinka eri ohjausvaihtoehdot vaikuttavat liikennetilanteeseen.
- 4) *Optimaalisen ohjaussuunnitelman luominen.* Optimaalisen ohjaussuunnitelman määrää yleensä tavoitefunktio, joka yhdistää useat tavoitesuureet. Usein tavoitefunktio esitetään puhtaana kustannusfunktiona ja tavoitteet rahamittaisina. Ohjausvaihtoehdoista valitaan kulloinkin se, joka johtaa pienimpiin kustannuksiin. (Balz & Zackor 1991.)

5 LIIKENTEEEN SEURANTA

5.1 Liikenteen seurantamenetelmän valinta

Liikenteen seurantaa voidaan suorittaa hyvin monella eri tavalla. Seuranta-järjestelmän valinta on riippuvainen suureista, joita halutaan mitata. Mitattavia suureita voivat olla muun muassa

- nopeus, nopeuden varianssi, suuret nopeuden muutokset, kaistojen väliset nopeuserot
- liikennemäärä
- liikennetiheys, varausaste
- lyhyiden aikavälien osuus
- jonojen määrä ja pituus, jonossa ajavien ajoneuvojen osuus
- ohitusten määrä
- tienpinnan ja ilman lämpötila
- tienpinnan kitka
- näkyvyys.

Suureista osa mitataan suoraan ja osa johdetaan mitatuista suureista (esimerkkeinä yksittäisen ajoneuvon nopeus ja viiden minuutin keskinopeus).

Suureet voivat olla paikallisia tai tiejaksokohtaisia ja hetkellisiä tai aikajaksoittaisia. Ne voidaan määrittää ajoneuvotyypeittäin tai yhteensä sekä kaistoittain, suunnittain tai molemmat suunnat yhteensä.

Taulukossa 5 on esitetty erilaisten automaattisten liikenteen ohjausjärjestelmien ja taulukossa 6 erilaisten automaattisten liikenteen tiedotusjärjestelmien tietotarpeita. On huomattava, että eri järjestelmien vaatima tietojen päivitystiheys ja tiedonhankinta-alueen maantieteellinen laajuus vaihtelevat. Liikenteen tiedotusjärjestelmillä voidaan antaa tietoa hyvin erilaisista liikenteeseen ja olosuhteisiin liittyvistä asioista, minkä takia myös järjestelmien tietotarpeet vaihtelevat erittäin paljon. (Kulmala & Luoma 2001a.)

Taulukko 5. Erilaisten automaattisten liikenteen ohjausjärjestelmien tietotarpeet
 (Kulmala & Luoma 2001a).

Ohjausjärjestelmä	Tietotarpeet
Liikennetilanteeseen perustuva tiejaksokohtainen liikenteen ohjaus (nopeuksien hallinta ja harmonisointi, häiriöiden havainnointi)	<ul style="list-style-type: none"> • Liikennemäärä ajoneuvoluokittain • Pistenopeus: keskiarvo ja keskihajonta • Varausaste • Jononpituus • Valvontakameran kuva • Automaattisen häiriöidenhavaitsemisjärjestelmän antama tulos
Keliin ja säähän perustuva tiejaksokohtainen liikenteen ohjaus	<ul style="list-style-type: none"> • Lämpötila: ilma, tie, maaperä, kastepiste • Sademäärä • Näkyvyys • Tuuli: nopeus, suunta, puuskaisuus • Lumen / veden / mustan jään esiintyminen tienpinnalla • Tiepinnan kitka • Valvontakameran kuva
Liikenneverkon liikenteen ohjaus	Pääosilta verkkoa: <ul style="list-style-type: none"> • Liikennemäärä ajoneuvoluokittain • Pistenopeus: keskiarvo ja keskihajonta • Varausaste • Linkkikohtaiset matka-ajat • Jononpituus • Valvontakameran kuva
Ramppiohjaus	<ul style="list-style-type: none"> • Liikennemäärä ajoneuvoluokittain • Pistenopeus: keskiarvo ja keskihajonta • Varausaste • Jononpituus
Kaistaohjaus	<ul style="list-style-type: none"> • Liikennemäärä ajoneuvoluokittain • Pistenopeus: keskiarvo ja keskihajonta • Varausaste • Valvontakameran kuva • Automaattisen häiriöidenhavaitsemisjärjestelmän antama tulos
Tunneliohjaus	<ul style="list-style-type: none"> • Liikennemäärä ajoneuvoluokittain • Pistenopeus: keskiarvo ja keskihajonta • Varausaste • Jononpituus • Valvontakameran kuva • Automaattisen häiriöidenhavaitsemisjärjestelmän antama tulos

Taulukko 6. Erilaisten automaattisten liikenteen tiedotusjärjestelmien tietotarpeet (Kulmala & Luoma 2001a).

Liikenteen tiedotusjärjestelmä	Tietotarpeet
Häiriöistä varoittava	<ul style="list-style-type: none"> • Liikennemäärä ajoneuvoluokittain • Pistenopeus: keskiarvo ja keskihajonta • Varausaste • Jononpituus • Valvontakameran kuva • Automaattisen häiriöidenhavaitsemisjärjestelmän antama tulos
Tietöistä tai erikoistapahtumista kertova	<ul style="list-style-type: none"> • Tietöiden/tapahtumien sijainti • Alkamis- ja päättymisajankohta • Tiedotus kiertoreiteistä • Liikenteelle aiheutuvat viivytykset: keskiarvo
Liikenneolosuhteista kertova	<ul style="list-style-type: none"> • Liikennemäärät ajoneuvoluokittain • Pistenopeus: keskiarvo ja keskihajonta • Varausaste • Linkkikohtaiset matka-ajat • Jononpituus
Onnettomuuksista ja häiriöistä kertova	<ul style="list-style-type: none"> • Jononpituus • Valvontakameran kuva • Automaattisen häiriöidenhavaitsemisalgoritmin antama tulos
Rajoituksista kertova	<ul style="list-style-type: none"> • Niiden tienkäyttäjien erottaminen, joita rajoitus koskee • Rajoituksen sijainti tieverkolla • Rajoituksen alkamis- ja päättymisajankohta • Tiedotus kiertoreiteistä • Liikenteelle aiheutuvat viivytykset: keskiarvo
Kelistä ja säästä kertova	<ul style="list-style-type: none"> • Lämpötila: ilma, tie, maaperä, kastepiste • Sademäärä • Lumen / veden / mustan jään esiintyminen tienpinnalla • Tiepinnan kitka • Näkyvyys • Tuuli: nopeus, suunta, puuskaisuus
Dynaaminen reittitieto	<ul style="list-style-type: none"> • Liikennemäärä • Linkki- tai väyläkohtainen matka-aika • Jononpituus

Pneumaattinen letkulaskuri ja koaksiaaalikaapeli ovat tekniikoina vanhentuneita ja kelpaavat vain tilapäisiin mittauksiin. Infrapunailmaisimet ovat herkkiä saasteille, luonnonvalon muutoksille ja kosteudelle ja niiden luotettavuus on suurilla liikennemäärillä huono. Tutkan ja ultraäänen avulla kerätyn aineiston laatu on riittävän hyvä liikenteen ohjausjärjestelmille, mutta ajoneuvojen luokittelu ei ole näillä ilmaisimilla erityisen tarkkaa. (Westerman 1995.)

Akustisista ilmaisimista luvataan vaihtoehtoa induktioilmaisimille, mutta menetelmä on vielä kehitysasteella. Magnetometri toimii induktioilmaisimen tapaan. Kehittyneet induktioilmaisimet täyttävät kaikki liikenteen ohjauksen asettamat vaatimukset ja niitä on testattu paljon. Haittana ovat kuitenkin korkeat asentamiskustannukset ja joskus esiintyvät merkittävät mittausvirheet. Videoilmaisimien avulla voidaan mitata monimutkaisia liikennetilanteita sekä matka-aikoja, joita ei voi muilla ilmaisimilla mitata suoraan. Videoilmaisimet

ovat kuitenkin kalliita ja herkkiä ilkvallalle sekä sään ja saasteiden vaikutuksille. (Westerman 1995.)

Kiinteiden ilmaisimien heikko puoli on se, että ne mittaavat yleensä poikkileikkauskohtaisia parametreja, kun taas monet sovellukset tarvitsevat ajantasaisia linkkikohtaisia tietoja vallitsevasta liikennetilanteesta. Toisin sanoen kiinteät ilmaisimet mittaavat liikenneprosessin ajallisia muutoksia jossain tietyssä pisteessä, mutta sovellukset tarvitsevat tietoa sekä ajallisista että paikallisista muutoksista koko liikenneverkolla (Hoose 1991, Westerman 1995). Taulukossa 7 on esitelty erilaisten parametrien seurantaan Pohjoismaissa ja Saksassa käytettyjä menetelmiä (Kulmala & Luoma 2001a).

Taulukko 7. Erilaisten parametrien seurantaan käytettyjä menetelmiä (Kulmala & Luoma 2001a).

Seurattava parametri	Seurantamenetelmät
Poikkileikkauskohtaiset liikennettä kuvaavat parametrit	Induktioilmaisoin, tutka, automaattinen punnitusasema, videoilmaisoin
Linkkikohtainen matka-aika	Anturijoneuvot, automaattinen punnitusasema, automaattinen ajoneuvon tunnistusjärjestelmä
Jononpituus	Valvontakamera, induktioilmaisoin
Automaattinen häiriöiden havainnointi	Valvontakamera, jossa häiriöiden tunnistusjärjestelmä, induktioilmaisoin, anturijoneuvot, automaattinen punnitusasema, automaattinen ajoneuvon tunnistusjärjestelmä
Manuaalinen häiriöiden havainnointi	Viranomaisten ja tienkäyttäjien raportit, valvontakamera
Yksittäisten ajoneuvojen nopeus	Induktioilmaisoin, tutka, videoilmaisoin
Yksittäisten liikennevalojen noudattaminen	Valo-ohjaukseen liitetty induktioilmaisimet, videoilmaisoin
Vaaralle alttiiden tienkäyttäjien läsnäolo	Mikroaaltoilmaisoin
Eläimien läsnäolo	Infrapunailmaisoin, mikroaaltoilmaisoin
Tieto tietöistä	Viranomaisten raportit
Tieto tapahtumista	Viranomaisten ja tienkäyttäjien raportit
Tieto rajoituksista	Viranomaisten raportit
Vapaiden parkkipaikkojen sijainti	Varausastetiedot pysäköinnin järjestäjiltä
Vallitseva nopeusrajoitus	Viranomaisten raportit
Poikkileikkauksen tiesääti	Tiesääasema, näkyvyys- ja sääilmaisoin, valvontakamera, tuulimittari
Poikkileikkauksen kelitieto	Lämpötilailmaisoin, tiesääasema, valvontakamera
Jatkuva tieto tienpinnan kunnosta	Anturijoneuvot
Alueellinen tai paikallinen tieto ilmanlaadusta	Ympäristöilmaisimet
Ajoneuvon kuormitustieto	Valvontakamera, jossa automaattinen kuvankäsittely
Ajoneuvon sijainti	GSM- tai satelliittipaikannus

Vain harva ilmaisintyyppi kykenee tuottamaan kaikki automaattisten liikenteen ohjaus- tai tiedotusjärjestelmien tarvitsemat tiedot liikenteestä (taulukko 8). Parhaiten tehtävän täyttävät induktioilmaisoin, magnetometri sekä kehittynyt videoilmaisoin. Taulukossa 9 on esitetty eri ilmaisimien avulla määritettyjen suureiden mitattu ja laskennallinen tarkkuus.

Taulukko 8. Automaattisille liikenteen ohjaus- ja liikenteen tiedotusjärjestelmille tärkeät parametrit sekä kykeneekö ilmaisintyyppi mittaamaan kyseistä suuretta (Innamaa 1999).

Ilmaisintyyppi	Liikennemäärä	Pistenoisuus	Varausaste	Jononpituus	Matka-aika	Huomautuksia
Pneumaattinen letkuilmaisoin	x	x				Tilapäisiin kohteisiin
Koaksiaali-ilmaisoin	x	x				Tilapäisiin kohteisiin
Infrapunailmaisoin	x		x			Huono suurilla liikennemäärillä, ei mittaa kaistoittain
Tutkailmaisoin	x	x	x	x		Ei mittaa kaistoittain
Ultraääni-ilmaisoin	x	x	x			Kokeiluasteella
Akustinen ilmaisoin	x	x	x	x		
Induktioilmaisoin	x	x	x	x		
Magnetometri	x	x	x	x		
Videoilmaisoin	x	x	x	x	x	

Taulukko 9. Eri ilmaisimilla mitattujen suureiden mitattu ja laskennallinen tarkkuus (Kulmala & Luoma 2001a).

Ilmaisoin	Parametri	Mitattu tarkkuus	Laskennallinen tarkkuus
Yksittäinen induktiosilmukka	Varausaste	± 3 ms	± 2 ms
Induktiosilmukka-pari	Ajoneuvojen lkm - kaikki ajon. - raskaat ajon. Nopeus Aikaväli Ajon. pituus	± 20 % ± 35 % ± 1 km/h ± 1 ms ± 0,02 m	± 3 % ± 5 % ± 0,5 km/h ± 0,5 ms ± 0,01 m
Mikroaaltoilmaisoin	Nopeus	± 1 km/h	± 0,5 km/h
WIM-ilmaisoinpari	Akselipaino Akselietäisyys Nopeus Liikennemäärä Aika	± 10 % ± 2 % ± 1 % ± 2 % ± 0,01 s	

Ilmaisintyyppin valintaan vaikuttaa mitattavien suureiden ja vaaditun mittaus-tarkkuuden lisäksi itse kohde. Maantielle on suhteellisen helppo asentaa mikä tahansa tiehen asennettava järjestelmä, siltaan sitä vastoin on hankalampi asentaa tien sisään laitettavia ilmaisimia. Tunnelissa on helppo asentaa mikä tahansa tien yläpuolelle tuleva ilmaisoin, mutta esimerkiksi maantiellä sellaisen asentaminen vaatii usein erillisen porttaalin.

Tällä hetkellä induktioilmaisoin lienee monissa kohteissa kiinteistä, pistekoh-taista seuranta suorittavista ilmaisimista monipuolisoin, ja linkkikohtaisia suu-reita lienee helpoin seurata kehittyneillä videoilmaisimilla. Ilmaisinsuosituk-siin ei kuitenkaan tässä ryhdytä, koska ilmaisintekniikka kehittyy jatkuvasti ja muutamien vuosien päästä voidaan todennäköisesti jo seurata suureita, joi-den seuranta pidetään tällä hetkellä erittäin hankalana (esimerkiksi ohitus-tiheys).

5.2 Seurantajärjestelmän rakenne

Seurantajärjestelmän rakenteeseen eli ilmaisimien sijaintiin vaikuttavat useat eri seikat, kuten

- suoritetaanko mittaus piste- vai linkkikohtaisin parametrein
- halutaanko mittausten avulla tunnistaa toistuvia ylikysyntätilanteita vai satunnaisten häiriöiden aiheuttamia ongelmia
- kuinka nopeasti ongelmiin pitää pystyä reagoimaan.

Se, tarkastellaanko piste- vai linkkikohtaisia suureita, on riippuvainen 1) ongelmasta, joka halutaan ratkaista, ja 2) parametreista, joita halutaan mitata. Yleisesti ottaen linkkikohtaiset parametrit soveltuvat hyvin aluekohtaisen ohjauksen perustaksi etenkin silloin, kun seurattava alue on suuri. Siinä missä pistekohtaisessa seurannassa tietoja saadaan nimensä mukaisesti liikenteen sujuvuudesta ynnä muusta yksittäisissä pisteissä, linkkikohtaisessa seurannassa suureet kertovat liikenteen sujuvuudesta linkillä. Jos pistekohtaisten ilmaisimien sijainti on valittu hyvin, pistekohtaiset suureet voidaan yleistää koko tarkasteltavalle alueelle tai linkille. Ilmaismia tarvitaan kuitenkin kattavan kuvan saamiseksi usein enemmän kuin linkkikohtaista seurantaa käytettäessä.

Molemmille seurantajärjestelmätyypeille pätee se, että mitä tiheämmässä ilmaisimia on, sitä tarkempi kuva liikenteestä saadaan, sitä nopeammin ongelmat havaitaan ja tunnistetaan ja niiden sijainti voidaan paikantaa. Ilmaisimet ovat kuitenkin kalliita sekä asentaa että ylläpitää, joten liikenteen seurantajärjestelmää suunniteltaessa tulisi löytää hyöty-kustannustasapaino ilmaisimien määrän ja lisäilmaisimien tuoman hyödyn välille.

Eräs mahdollisuus on tuottaa mallintamisen avulla linkki- tai aluekohtaisia suureita pistemittausten avulla. Tällöin alueen liikennetilanteesta tehdään laskennallinen malli, joka saa syötteikseen pistemittautiedot liikennemäärästä eri poikkileikkauksista, kaistajakaumista ja niin edelleen. Mallin avulla voidaan jatkuva-aikaisesti laskea ohjauksen tarvitsemat tunnusluvut järjestelmän tilasta. Tunnusluvut voivat liittyä liikenteen sujuvuuteen, päästöihin ja turvallisuuteen. Tällöin seurataan todellisen liikenteen sijaan mallin liikennettä, jota kalibroidaan jatkuvasti todellisten mittaustulosten pohjalta. (Kosonen 2001.)

Ylikysynnästä aiheutuvat ongelmat alkavat niin kutsutuista pullonkaulakohdista. Näillä kohdilla tarkoitetaan tienosia, joilla on muuta tietä alhaisempi välityskyky. Jos seurantajärjestelmän tavoitteena on siis tunnistaa ylikysynnästä johtuvat liikenteen ongelmat, ilmaisimet pitäisi sijoittaa potentiaalsiin pullonkaulakohtiin (liittyvien ramppien läheisyys, ylämäet, tien kapeneminen ja niin edelleen). Jos liikenne sujuu pullonkaulakohdissa, se sujuu varmasti niiden välilläkin (olettaen, ettei tiellä ole muita kuin ylikysynnästä aiheutuvia liikenteen häiriöitä). Ylikysynnästä aiheutuvien ongelmien havaitsemiseen riittää usein liikennemäärän tai varausasteen ja liikennevirran keskinopeuden seuraaminen.

Satunnainen liikenteen häiriö ei välttämättä ala pullonkaulakohdasta, vaan sen voi käynnistää esimerkiksi kaistan tukkiva rikkoutunut ajoneuvo tai muu vastaava. Tällaisten häiriöiden havaitsemista varten ilmaisimia tulisi asentaa koko tarkasteltavalle linkille, myös muualle kuin varsinaisiin pullonkaulakoh-

tiin. Mitä harvemmassa ilmaisimia on, sitä hitaammin häiriöt keskimäärin havaitaan.

Häiriötä ei voida havaita ennen kuin sen vaikutukset näkyvät ilmaisimen kohdalla. Häiriöiden nopea tunnistaminen ei kuitenkaan välttämättä ole koko linkillä yhtä kriittistä. Jos satunnainen liikenteen häiriö tapahtuu tieosalla, jossa liikennemäärä on erittäin suuri, häiriö on vakavampi kuin vähemmän liikennöidyillä tieosilla. Vastaavasti, jos häiriö tapahtuu tieosalla, jolla on ympäröivää tietä alhaisempi välityskyky (pullonkaula), häiriöön täytyy reagoida nopeasti, jottei tie pääse tukkiutumaan kokonaan. Jos siis ilmaisimien määrää halutaan rajoittaa, niiden määrästä voidaan tinkiä alueilla, joilla on muuhun tiehen verrattuna alhainen kuormitusaste.

Toinen häiriön havaitsemisen nopeuteen liittyvä tekijä, joka vaikuttaa myös ilmaisimien sijaan, on aggregointijakson pituus. Aggregointijaksolla tarkoitetaan sitä ajanjaksoa, jolle keskimääräiset suureet (liikennemäärä, keskinopeus ja niin edelleen) määritetään. Aggregointijakso voidaan määrittää sen perusteella, kuinka suurta satunnaisvaihtelua suureisiin sallitaan, kuinka nopeasti muutokset täytyy havaita tai kuinka usein tietoa siirretään ilmaisimilta ohjauskeskukseen.

Mitä lyhyempi aggregointijakso on, sitä suurempi on satunnaisvaihtelu, koska suuri otoskoko tasaa arvoja (lasketaan minuuttikohtaisten keskiarvojen tai liukuvien keskiarvojen sijaan esimerkiksi 15 minuutin arvoja). Mitä enemmän havaintoja keskiarvon perustana on, sitä vaikeampi on havaita alkavia trendejä. Jos siis esimerkiksi nopeudet alkavat laskea pitkän aggregointijakson lopulla, keskinopeus ei välttämättä eroa merkittävästi "normaalista" keskinopeudesta (muutos kuuluu normaaliin satunnaisvaihteluun). Sitä vastoin lyhyemmällä aggregointijaksolla muutos vaikuttaa keskiarvoon voimakkaammin ja tulee tätä kautta havaituksi. Myös se, kuinka usein tietoa siirretään ilmaisimilta keskuskoneelle, vaikuttaa siihen, kuinka pitkää aggregointijaksoa kannattaa käyttää. Jos siirrot tehdään esimerkiksi kerran 15 minuutissa, on minuutin aggregointijakso turhan lyhyt.

Jos aggregointijakso on lyhyt, ilmaisimia voi olla suhteellisen tiheässä ja silti niistä saadaan uutta tietoa liikenteestä. Ilmaisimia ei kuitenkaan kannata asentaa kovin kauas ohjattavalta alueelta ylävirtaan, koska näiden ilmaisimien havaitsemat ajoneuvot eivät ehdi vielä useamman aggregointijakson aikana ohjattavalle alueelle. Jos taas aggregointijakso on pitkä, ilmaisimia on turha asentaa kovin tiuhaan, koska pitkän aikajakson keskiarvot ovat vierekkäin sijaitsevilla poikkileikkauksissa lähes identtiset, ensimmäiset ilmaisimet ylävirrassa voivat sitä vastoin olla edellä esitettyä tilannetta kauempana.

Jos siis aggregointijakso on esimerkiksi 15 minuuttia, ilmaisimia ei kannata asentaa sadan metrin välein, koska 15 minuutin keskiarvot eivät poikkea näillä ilmaisimilla toisistaan merkittävästi. Jos taas aggregointijakso on esimerkiksi viisi minuuttia, ei ilmaisinta kannata asentaa kymmentä kilometriä ennen ohjattavaa aluetta, koska nämä ajoneuvot eivät ehdi vielä useampaan aggregointijaksoon ohjattavalle alueelle.

Nyrkkisääntönä voidaan pitää, että eri ilmaisimilla aggregointijakson kuluessa havaituksi tulevien ajoneuvojen pitäisi suurelta osin erota toisistaan, jotta ilmaisimien toisi lisätietoa liikennevirran ominaisuuksista. Jos aggregointijakson pituuden perusteella määritettävät ilmaisimien minimietäisyydet tuntuvat liian suurilta, kannattaa miettiä, pitäisikö aggregointijaksoa lyhentää.

Lisäksi on hyvä pitää mielessä, että ilmaisimia on turha asentaa kohteisiin, joissa liikenne usein seisoo paikallaan. Tällaisia paikkoja ovat muuan muassa kaksikaistaisten teiden tasoliittymät.

Jos halutaan ennakoida liikennetilanteita ja niiden kehittymistä (ennakointimenetelmistä tarkemmin liitteessä B), kannattaa ilmaisimia sijoittaa ohjattavalta alueelta ylävirtaan. Lisäksi ilmaisimia kannattaa sijoittaa ohjattavalle alueelle liittyville rampeille ja teille. Erittäin vähäliikenteiset rampit ja liittyvät tiet voidaan jättää varustamatta ilmaisimilla, mutta erityisesti vilkkaasti liikennöityjen liittyvien väylien liikenteen kehitys heijastuu myös varsinaiselle seurattavalle alueelle. Näiden ennakoivien ilmaisimien sijainnissa kannattaa pitää mielessä edellä aggregointijakson pituuden kohdalla mainitut seikat.

Tutkimustarkoituksia varten on tärkeää, että ilmaisimet on sijoitettu niin sannotuihin edustaviin paikkoihin. Tutkimuksia varten ilmaisimilla kerätyt aineistot on hyvä tallentaa tietokantaan myös ajoneuvokohtaisina tietoina. Näin ei turhaan rajata tutkijoiden mahdollisuuksia jo etukäteen.

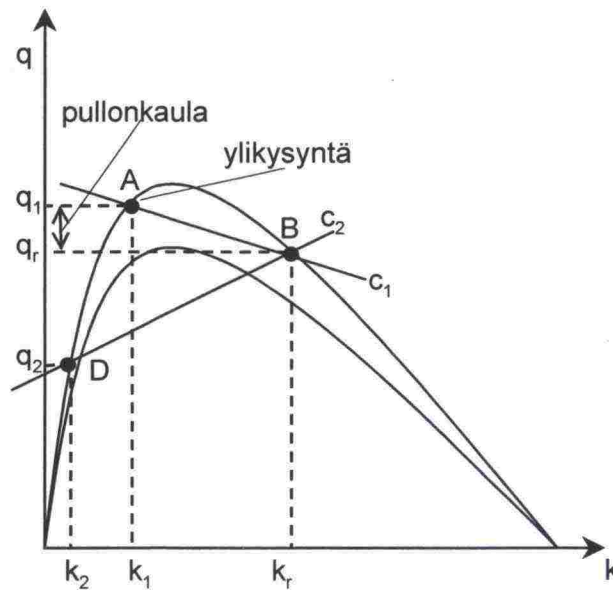
5.3 Teoreettinen ilmaisinten minimitiheys

Ilmaisimien minimitiheyttä voidaan arvioida teoreettisesti tarkastelemalla ruuhkautumista tilanteissa, joissa tiejakson välityskyky on jostain syystä alentunut. Teoria pohjautuu shokkiaaltojen teoriaan. Siinä lähdetään oletuksesta, että liikennevirrassa tapahtuvat liikennetiheyden muutokset etenevät vakionopeudella (c), joka määräytyy liikennevirran peruskuvaajasta liikennemäärän (q) ja -tiheyden (k) muutosten osamääränä.

$$c = \frac{q_1 - q_2}{k_1 - k_2}$$

Shokkiaallon nopeuden etumerkki kertoo, kumpaan suuntaan aalto etenee. Jos nopeus on positiivinen, aalto liikkuu eteenpäin (liikennevirran suuntaan) ja, jos se on negatiivinen, vastakkaiseen suuntaan.

Ylikysyntätilanne syntyy esimerkiksi silloin, kun tiellä on paikallinen pullonkaula. Tällöin tilanne on kuvan 14 mukainen. Kun liikennemäärä tiellä ylittää pullonkaulan välityskyvyn, muuttuu tilanne pullonkaulaa edeltävällä tieosalla tilasta A tilaan B, jossa liikennemäärä on pullonkaulan välityskyvyn suuruisen. Samalla tielle syntyy taaksepäin etenevä shokkiaalto, jonka nopeus on yhtä kuin suoran AB kulmakerroin c_1 . Kun ylikysyntä loppuu, muuttuu liikennevirta tilasta B tilaan D ja vastaavan shokkiaallon nopeus on nähtävissä suoran BD kulmakertoimesta c_2 . (Drew 1968, Papacostas 1987.)



Kuva 14. Shokkiaallot paikallisessa pullonkaulassa (Pursula & Innamaa 2001).

Liikenteen häiriötarkastelussa ei kuitenkaan aina ole kyse pysyvistä pullonkauloista eikä siitä, että ruuhka helpottaisi kysynnän laskun takia. Pikemminkin on kyse tilanteista, joissa kysyntä pysyy suhteellisen vakiona ja ruuhka aiheutuu hetkellisestä välityskyvyn laskusta. Ruuhka siis purkautuu välityskyvyn palautumisen takia, ei siksi, että kysyntä laskisi.

Häiriön tapahduttua lähtee häiriökohdasta kuvan 14 mukaisessa tapauksessa ylävirtaan shokkiaalto, joka etenee nopeudella c_1 .

$$c_1 = \frac{q_r - q_1}{k_r - k_1}$$

Yhtälössä liikennemäärä q_1 ja -tiheys k_1 mitataan ylävirrasta ja vastaavasti q_r ja k_r ovat häiriökohdasta. (Pursula & Innamaa 2001.)

Tieto häiriöstä (alempi nopeus, suurempi varausaste) etenee häiriökohdasta ylävirtaan sijaitseville ilmaisimille nopeudella c_1 . Havainto saapuu liikennekeskukseen ajan T kuluttua. Pahimmassa tapauksessa T on

$$T_{\max} = \frac{L}{|c_1|}$$

ja keskimäärin

$$\bar{T} = \frac{1/2 L}{|c_1|}$$

Yhtälöissä L on ilmaisimien välinen etäisyys. (Pursula & Innamaa 2001.)

Kun häiriön aiheuttama pullonkaula saadaan purettua, lähtee häiriökohdasta alavirtaan shokkiaalto, jonka nopeus on c_2 .

$$c_2 = \frac{q_2 - q_r}{k_2 - k_r}$$

Yhtälössä liikennemäärä q_2 ja -tiheys k_2 mitataan alavirrasta ja vastaavasti q_r ja k_r ovat häiriökohdasta. (Pursula & Innamaa 2001.)

Syntyvän ruuhkan kesto ja tielle syntyvän liikennetihentymän (jonon) pituus voidaan laskea yksinkertaisesti, kun ylikysynnän kesto tunnetaan. Tilannetta voidaan havainnollistaa matka-aikakoordinaatistossa kuvan 15 mukaisesti, jolloin ruuhkan pituus tiellä eri ajankohtina on luettavissa. Koko ruuhkaan joutuva ajoneuvomäärä V_{tot} voidaan laskea kaavalla

$$V_{tot} = q_c t_r$$

missä q_c on pullonkaulan välityskyky ja t_r ruuhkan kesto. Kasvavan ruuhkan ajoneuvomäärä V_1 ja purkautuvan V_2 voidaan laskea seuraavasti.

$$V_1 = tq_r + k_r \cdot |c_1| \cdot t$$

$$V_2 = V_{tot} - V_1$$

Yhtälöissä t on aika, jolloin ruuhka kasvaa (tässä tapauksessa: aika, joka menee häiriön havaitsemiseen ja välityskyvyn normaaliksi palauttamiseen), q_r ja k_r ovat ruuhkatilanteen liikennemäärä ja -tiheys ja c_1 on shokkiaallon nopeus. Ruuhkan purkautumiseen kuluu aikaa

$$t_r - t = \frac{l}{|c_2|} = \frac{|c_1|}{|c_2|} \cdot t$$

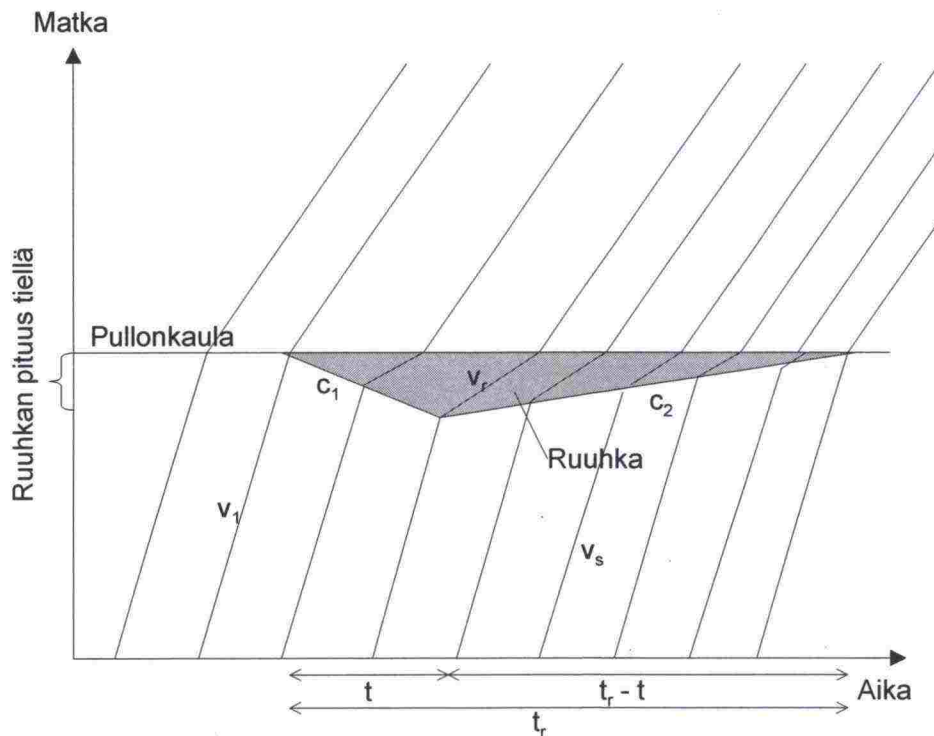
Ruuhkan pituus l tiellä lasketaan

$$l = t \cdot |c_1|$$

ja keskimääräisen viivytyksen \bar{d} kaava on

$$\bar{d} = \frac{\frac{1}{2} V_1 l \left(\frac{1}{v_r} - \frac{1}{v_1} \right) + \frac{1}{2} V_2 l \left(\frac{1}{v_r} - \frac{1}{v_s} \right)}{V_1 + V_2} \approx \frac{1}{2} l \left(\frac{1}{v_r} - \frac{1}{v_1} \right)$$

Kaavassa v_r on ajoneuvojen nopeus ruuhkassa, v_1 on kasvavaan ruuhkaan saapuvien ajoneuvojen nopeus ja v_s purkautuvaan ruuhkaan saapuvien ajoneuvojen nopeus. Approksimaatio perustuu oletukseen, että $v_s \approx v_1$. (Pursula & Innamaa 2001.)



Kuva 15. Ruuhkan havainnollistaminen matka-aikakoordinaatistossa (Pursula & Innamaa 2001).

Jos ilmaisimien minimietäisyys halutaan määrittää edellä esitellyn shokkiaaltoteorian mukaan, on päätettävä, minkä asteinen liikenteen häiriö katsotaan niin vakavaksi milläkin liikennemäärällä, että siihen on reagoitava nopeasti ja miten tämä "nopeasti" määritellään kussakin tilanteessa. Häiriön havaitsemisnopeus (shokkiaallon etenemisnopeus) on edellä esitetyn mukaisesti voimakkaasti riippuvainen vallitsevasta liikennemäärästä ja häiriön vakavuudesta (välityskyvyn alenemasta). Mitä suurempi on liikennemäärä ja välityskyvyn alenema (eli mitä vakavampi häiriötilanne), sitä nopeammin häiriö joka tapauksessa näkyy ilmaisimilla ja sitä nopeammin se voidaan havaita.

Käytännössä voidaan lähteä minimipalvelutason ajatuksesta. Päätetään, ettei tien palvelutaso saisi satunnaisen liikenteen häiriön takia laskea alle tietyn tason. Tiedetään, että häiriöön voidaan reagoida vasta, kun sen vaikutukset näkyvät ilmaisimilla. Lisäksi tiedetään, että tiepalvelun tai muun vastaavan häiriöpaikalle saamiseen menee tietty aika. Ilmaisimien minimietäisyys pitäisi siis määrittää siten, etteivät häiriön aiheuttamat viivytykset kasva haluttua palvelutasoa vastaavia viivytyksiä suuremmiksi.

5.4 Algoritmeja satunnaisten häiriöiden havaitsemiseen

Automaattinen häiriöiden havaitseminen on tärkeä osa liikenteen hallintaa. Se on erityisen tärkeää tunneleissa ja muissa riskipaikoissa. Tarvittavan häiriöiden havaitsemisjärjestelmän luonne on riippuvainen häiriön määritelmästä ja liikenteen määrästä. (Bell 1994.)

Häiriöiden hallinta jaetaan neljään vaiheeseen: häiriön havaitsemiseen, siihen reagoimiseen, häiriön poistamiseen siihen liittyvine liikenteen hallinnan toimenpiteineen ja liikenteen normaaliksi palautumiseen. Aika, joka häiriöstä selviytymiseen menee, riippuu siitä, kuinka nopeasti kustakin vaiheesta selvittää. (Lee & Hwang 1998.)

Ohjausjärjestelmän toimivuus on riippuvainen jokaisesta yksittäisistä funktioista ja niiden välisestä koordinaatiosta. Häiriöiden havainnointijärjestelmän toimintaan vaikuttavia tekijöitä ovat

- ilmaisinjärjestelmän tuottaman tiedon määrä
- mittauksien tarkkuus
- järjestelmän osien virheen sieto
- liikennemallin tyyppi (yksityiskohtaisuus ja validoinnin aste)
- mallin reaktioaika
- erilaisten liikennetilanteiden ja häiriöiden erottelu
- päätöksentekoprosessin nopeus
- valittujen toimenpiteiden oikeellisuus
- toimenpiteiden täytäntöönpanon nopeus.

Edellisen listan viimeisen kohdan tärkeyttä ei pidä aliarvioida, koska tehokkaan häiriöiden havainnoinnin mahdollistamat useiden minuuttien säästöt ovat mahdollisia ainoastaan silloin, jos tarvittavat toimenpiteet saadaan toteutettua viiveettä. Järjestelmän toiminnan kannalta olennaisimpia osia ovat siis liikennemalli ja sen kyky erottaa erilaiset liikenneolosuhteet, yhtä lailla kuin malliin liittyvä strategia. (Busch 1991.)

Häiriöiden havaitsemisalgoritmit voidaan jakaa paikallisiin ja alueellisiin sen mukaan, tarkkaillaanko yhtä vai useampaa paikkaa. Lisäksi mallit voidaan jakaa mikroskooppisiin ja makroskooppisiin sen mukaan, perustuuko algoritmi yksittäisistä ajoneuvoista kerättyihin tietoihin vai esimerkiksi 30 sekunnin keskiarvoihin. Algoritmeista on monia eri sovelluksia, mutta niiden toiminnan peruseriaatteet on listattu alla. (Busch 1991, Bell 1994, Wang & Siopiku 1998, Pursula 1988.)

- *Suora vertailu.* Mitattuja tai mitatuista arvoista johdettuja tunnuslukuja verrataan ennalta asetettuihin kynnysarvoihin. Menetelmä on hyvin yksinkertainen, mutta tehokas. Parhaita testisuureita ovat varausaste ja keskinopeus tai näiden yhdistelmä. Vertailevan algoritmin etuna on sen yksikertaisuus ja se, ettei ole tarvetta monimutkaisiin kalibrointeihin eikä liikennedatata tarvitse muokata. Haittana taas on, ettei menetelmä sovi dynaamiseen liikenneolosuhteiden tunnistamiseen, väärin hälytysten osuus on korkea ja kiinteät kynnysarvot ovat joustamattomia. Esimerkkinä vertailevasta algoritmista on HIOCC, joka tunnistaa epätavallisen korkeat varausasteet raja-arvojen avulla.
- *Ajallinen ennuste tai aikasarja-algoritmi.* Verrataan mitattuja arvoja ennustettuihin. Menetelmä perustuu oletukseen, ettei ennustemalli kykene ennakoimaan satunnaisia häiriöitä ja näin mitatut arvot eroavat häiriötilanteessa ennustetuista enemmän kuin liikenteen satunnaisvaihtelun verran. Parhaat vertailusuureet ovat samat kuin edellä. Aikasarja-algoritmien etuna on, että ne voivat ottaa huomioon vaihtelut mittauksissa myös häiriöttömissä olosuhteissa. Esimerkkeinä ovat ARIMA-algoritmi ja korkea varausaste -algoritmi, joka havaitsee paikallaan olevat tai hitaasti liikkuvat ajoneuvot yksittäisten ilmaisimien varausasteen perusteella.

- *Hahmontunnistus.* Algoritmit perustuvat oletukseen, että häiriöttömissä olosuhteissa ylävirran liikenteen piirteet heijastuvat alavirran liikennevirrassa tietyn ajan kuluttua. Jos näin ei ole tai viive muuttuu merkittävästi, on tapahtunut häiriö. Menetelmällä on saatu hyviä tuloksia etenkin pienillä liikennemäärillä. Mittasuureina on yleensä liikennetiheys tai varausaste. Esimerkkinä hahmontunnistusalgoritmista on Kalifornia-algoritmi, joka perustuu oletukseen, että häiriötilanteessa ylävirran ilmaisimen varausaste kasvaa samalla, kun alavirran ilmaisimen laskee.
- *Tilastolliset algoritmit.* Algoritmit vertaavat mitattuja parametriarvoja estimoituihin arvoihin ja määrittävät, ovatko arvot estimoitujen arvojen luottamusvälin ulkopuolella. Luottamusväli määritellään häiriöttömästä liikenteestä kerätyn aineiston avulla. Keskihajonta-algoritmi perustuu oletukseen, että nopea muutos mitatussa muuttujassa viittaa häiriön olemassaoloon. Algoritmillä on korkea havaitsemisaste ja väärin hälytysten osuus, mutta lyhyt havaitsemisaika. Bayesiläinen algoritmi laskee häiriön todennäköisyyttä aikaisemman aineiston perusteella.
- *Malliin perustuva estimointi.* Tarkasteltavan poikkileikkauksen liikennejärjestelmää kuvaamaan määritellään yksinkertainen matemaattinen malli. Algoritmit olettavat, että häiriön aiheuttamat muutokset liikennevirrassa noudattavat ennalta tunnettua mallia. Menetelmissä käytetään usein Kalman-Bucy-suodatinta ja mittaussuureina ovat liikennemäärä ja nopeus. Liikennemallimenetelmät havaitsevat häiriöitä erilaisten liikennevirtateoriaan perustuvien suureiden avulla, jotka kuvaavat liikennettä häiriötilanteessa. Tällaiset mallit kuvaavat liikenteen dynaamisuutta liikennevirran peruskuvaajien avulla.
- *Klusterianalyysi.* Häiriöliikenteessä ja häiriöttömässä liikenteessä mitattujen liikenneparametrien joukkoa tutkitaan klusterianalyysin avulla. Tuloksena saadaan klustereita, jotka muodostuvat erilaisista liikennetilanteista.
- *Todennäköisyyteen perustuvat menetelmät.* Mitä tahansa häiriön havaitsemismenetelmää voidaan kehittää liittämällä siihen häiriön tilastollinen todennäköisyys.

Yleensä vertailuissa havaitaan, ettei mikään algoritmi osoittaudu ylivoimaiseksi kaikissa olosuhteissa. Suuri osa algoritmeista havaitsee valtaosan häiriöistä nopeasti, kun liikennemäärä on suuri ja ilmaisinten välimatka korkeintaan kilometri. Sitä vastoin alhaisilla liikennemäärillä iso osa algoritmeista toimii huonosti, koska shokkiaallot etenevät hitaasti ja hajoavat nopeasti. Hiljaisessa liikenteessä parhaat tulokset on saatu hahmontunnistusalgoritmeilla. Mitä pidempi ilmaisinten välimatka on, sitä korostetummin algoritmit toimivat paremmin suurilla liikennemäärillä. (Busch 1991.)

Väärin hälytysten välttämiseksi useimmat häiriöiden havaitsemisjärjestelmät toimivat siten, että algoritmin pitää viitata häiriöön tietyn ajan verran ennen kuin järjestelmä antaa hälytyksen. Tämä kuitenkin pidentää häiriön havaitsemisaikaa. Tasoittamiseen tai suodattamiseen perustuviin algoritmeihin ei ole tätä ongelmaa (Wang & Sisiopiku 1998). Häiriöiden havaitsemisessa on käytetty Kalman-suodatustekniikoita, joita on sovellettu makroskooppisiin liikennevirtaparametreihin (liikennemäärä, liikennetiheys ja keskinopeus) (Bell 1994, Holma 1991, Pursula 1988). Suodattamiseen perustuvia tekniikoita käytetään usein yhdessä muiden tekniikoiden kanssa (Lee & Hwang 1998).

Perinteiset häiriöidenhavaitsemisalgoritmit toimivat silloin, kun liikennettä on kohtalaisesti tai paljon. Kokemus on osoittanut, että induktioilmaisimilla mitattavista parametreista (varausaste, liikennemäärä ja nopeus) nopeus on ainoa, joka kykenee erottamaan häiriöt riittävän hyvin. Pienillä liikennemäärillä nämä parametrit eivät ole käyttökelpoisia. Täysin yhdistelemättömien parametrien (aika, jolloin ajoneuvo ohittaa ilmaisimen) käytöstä on tehty koikeita ajoneuvoja laskemalla, jolloin ajoneuvot on havainnoitu tutkittavalle tiejaksolle tullessa ja sieltä poistuttaessa. Tavoitteena on löytää ajoneuvot, jotka havaitaan tiejakson alkupisteessä, mutta jotka eivät poistu tiejaksolta tietyn aikajakson aikana. Tämän tyyppiset algoritmit ovat erityisen riippuvaisia ilmaisimien toiminnan luotettavuudesta. (Bell 1994.)

Pistemittauksiin perustuvissa häiriöidenhavaitsemismenetelmissä on puutteita, joita ei voida voittaa parantelemalla algoritmeja. Häiriötä ei havaita ennen kuin sen aiheuttamat vaikutukset voidaan mitata ilmaisimella. Tämä yleensä pidentää havaitsemisaikaa ja kasvattaa sekundaarihäiriöiden riskiä. Tästä syystä aluehavainnointi kiinnostaa (Bell 1994).

Häiriöiden havaitsemiseen on tullut myös monia uusia menetelmiä. Näitä ovat muun muassa videokuvan analysointi, tekoälysovellukset sekä anturi-ajoneuvot. Videokuvamenetelmät perustuvat kolmeen periaatteeseen: Ensimmäisessä kameraa käytetään induktioilmaisimen tapaan. Menetelmällä on samat heikkoudet kuin perinteisillä häiriöidenhavaitsemisalgoritmeilla. Ilmaisimen tunnistamiskyky on myös voimakkaasti riippuvainen kameran sijainnista. Menetelmän etuna on kamerailmaisimen tehokkuus induktioilmaisimiin verrattuna. Yksi kamerailmaisimella voi vastata kolmesta kuuteen induktioilmaisinta. (Wang & Sisiopiku 1998.)

Toinen periaate on seurata kameralla yksittäisiä ajoneuvoja ja saada näin ajoneuvojen liikkeestä mikroskooppisia tietoja, jotka kuvastavat liikennevirtaa. Tällaisia tietoja ovat muun muassa äkilliset kaistanvaihdot ja paikallaan olevat ajoneuvot, joita on vaikea havaita perinteisin keinoin. Periaatteista viimeinen käyttää liikennevirran tila- ja aikaparametreja epätavallisen ruuhkan tai liikenteen jonoutumisen tunnistamiseen. (Wang & Sisiopiku 1998.)

Etuina videokuvaa hyväksi käyttävissä menetelmissä on niiden kyky havaita paikallaan olevia ja hitaasti liikkuvia ajoneuvoja. Videoilmaisimilla on korkea havaitsemisaste yhdistettynä nopeaan havaitsemisaikaan ja induktioilmaisimiin verrattuna alhaiset asennus- ja ylläpitokustannukset. Lisäksi niillä on mahdollista saada tiejaksokohtaisia tietoja liikennevirrasta samoin kuin aikariippuvaisia parametreja. Raakadata saadaan myös helposti tallennettua ja yhdistettyä muihin järjestelmiin. (Wang & Sisiopiku 1998.)

Vaikka videokuvaa hyväksi käyttävillä tekniikoilla on mahdollisuus korvata induktioilmaisimet aineiston keräämisessä, on silti ratkaistava monta ongelmaa. Ilmaisimen toimivuus on ensinnäkin riippuvainen hyvästä taustakuvasta. Myös liikennevalot, sää ja vuorokaudenaika vaikuttavat toimivuuteen. Häiriöidenhavaitsemisaika on riippuvainen järjestelmän prosessointitehosta (Wang & Sisiopiku 1998). Usein videota kuitenkin käytetään yhä vain tarpeen vaatiessa, täydentämään muita häiriöidenhavaitsemisjärjestelmiä (Bell 1994).

1990-luvulla on julkaistu suuri määrä tutkimuksia, jotka käsittelevät neuroverkkosovelluksia häiriöiden havaitsemisessa. Neuroverkkoja käytettäessä pitäisi verkon opettamiseen olla käytössä tietokanta sekä häiriöttömästä liikenteestä että liikenteen häiriöistä eri teillä. Neuroverkkosovelluksilla ei ole

perinteisten menetelmien aineiston katkeamisesta aiheutuvia ongelmia, koska ne perustuvat aikaisempaan aineistoon eikä katkeamisella ole vaikutusta. Ainoaksi hankaluudeksi jää siis riittävän hyvän tietokannan kokoaminen (Wang & Sisiopiku 1998). Dia & Rose (1997) ovat testanneet neuroverkkoon perustuvia häiriöidenhavaitsemisalgoritmeja suurella maastosta kerätyllä tietokannalla. He ovat myös selvittäneet aineiston määrän vaikutusta neuroverkkoihin perustuviin häiriöidenhavaitsemismalleihin (Dia & Rose 1998). Esimerkiksi Chang (1992) on havainnut omassa tutkimuksessaan häiriöaineiston vähyyden aiheuttavan ongelmia verkon opettamisessa.

Toinen merkittävä tekoälysovellus, jota käytetään häiriöiden havaitsemisessa, on sumea logiikka. Muun muassa Kalifornia-algoritmia on parannettu sumean logiikan avulla. Sumean logiikan etuja häiriöiden havaitsemisessa ovat sen sopeutuminen mittasuureiden heilahteluihin ja epätarkkoihin tietoihin sekä sen sopeutuvat raja-arvot. Sumean logiikan heikkouksia ovat laskentamäärän lisääntyminen ja näin ollen muihin menetelmiin verrattuna tehokkaampien tietokoneiden tarve. Myös jäsennysfunktioiden määrittäminen saattaa olla vaikeaa (Wang & Sisiopiku 1998). Sumeaa logiikkaa käytetään erityisesti häiriön tapahtumispaikan ja vakavuuden estimoimiseen (Lee & Hwang 1998).

Anturijoneuvolähestymistavassa häiriöiden havaitseminen perustuu anturijoneuvojen välittämiin matka-aikatietoihin. Menetelmän etuna on sen helppo laajentaminen yksinkertaisesti lisäämällä anturijoneuvojen määrää. (Wang & Sisiopiku 1998.)

Jos halutaan kokeilla häiriöiden havainnointijärjestelmän toimivuutta tai vertailla useampaa erilaista järjestelmää, kannattaa määrittää seuraavat tunnusluvut

- häiriöiden havaitsemisaste
- väärrien hälytysten osuus (jo viisi prosenttia on usein liikaa)
- keskimääräinen havaitsemisaika
- keskimääräinen havaitsemisen ja häiriön katoamisen välinen viive
- havaitsemisindeksi eli keskimääräinen painotettu havaitsemisen laatu (havaitsemisen, havaitsemisajan ja häiriön tyypin ja vakavuuden merkittävyys)
- häiriöiden havaitsemisen kustannukset eli tarvittujen ilmaisimien määrä ja tyyppi, tarvittu tiedonkäsittelyn määrä, jne.

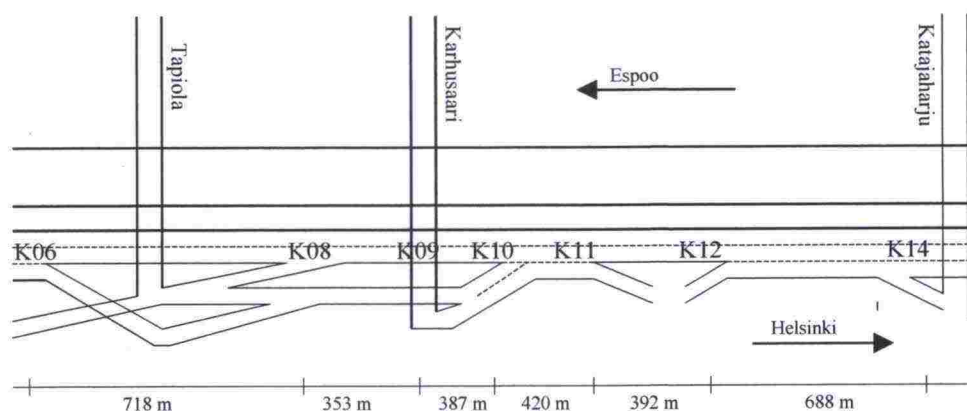
On huomattava, että nämä tunnusluvut lasketaan aina jollekin tietylle ajakaksolle ja niiden täytyy koskea kokonaista seurantajärjestelmää. (Busch 1991.)

EU:n Viking-alueen tieverkolle on määritelty tavoitteeksi, että häiriön tapahtumispaikka määritettäisiin oikein 99 prosentissa tapauksista. Häiriön kesto ja häiriön selvittämiseen menevä aika pitäisi kyetä arvioimaan 15 minuutin tarkkuudella 95 prosentissa tapauksista. Häiriön tyyppi pitäisi kyetä arvioimaan oikein 99 prosentissa tapauksista ja häiriön vaikutukset 95 prosentissa tapauksista. Vaihtoehtoisista reiteistä pitäisi kyetä tiedottamaan 99 prosentissa tapauksista, joissa vaihtoehtoinen reitti on olemassa. Häiriöstä tiedotaneen tahon luotettavuus pitäisi tarkastaa 99 prosentissa kaikista tapauksista. (Kulmala & Luoma 2001b.)

6 LÄNSIVÄYLÄYLÄN AUTOMAATTINEN LIIKENTEEN OHJAUSJÄRJESTELMÄ

6.1 Länsiväylän nykyinen liikenteen ohjausjärjestelmä

Länsiväylälle on asennettu liikenteen ruuhkautumisesta ja jonoista varoittava ohjausjärjestelmä. Tienkäyttäjille järjestelmä näkyy muuttuvina nopeusrajoitus- ja varoitusmerkkeinä (Uudenmaan tiepiiri 1996). Järjestelmän ensimmäinen vaihe otettiin käyttöön vuonna 1996 ja toinen vaihe vuonna 1999. Ensimmäinen vaihe ulottuu Porkkalankadulta Katajaharjun eritasoliittymään ja toinen vaihe Katajaharjusta Hakalehdon kohdalle.



Kuva 16. Länsiväylän tutkimusalueen ilmaisimet ja muuttuvat opasteet sekä näiden väliset etäisyydet.

Toisen vaiheen alueella on ilmaisimia 350–720 metrin välein. Ilmaisimet on sijoitettu siten, että jokaisen kahden peräkkäisen rampin välillä on vähintään yksi ilmaisinoikkileikkaus. Linjaosuuden lisäksi myös liittyvillä ja poistuvilla rampeilla on ilmaisimet.

Länsiväylän ruuhkavaroitussjärjestelmän tärkein tavoite on liikenneturvallisuuden parantaminen. Ohjausjärjestelmä ei poista Länsiväylän ruuhkia, mutta sen tavoitteena on lievittää ruuhkautumisen haittoja liikenteelle ja ympäristölle. (Uudenmaan tiepiiri 1996.)

Länsiväylällä nopeusrajoitus voi saada arvot 60, 70, 80 ja 100 km/h. Tosin toistaiseksi suurin sallittu nopeusrajoitus on 80 km/h. Varoitusmerkit voivat varoittaa ruuhkasta, liukkaudesta tai tietöistä. Ruuhkavaroitussmerkin käyttäminen ei ole sallittua silloin, kun saman merkin nopeusrajoitus näyttää arvoa 100 km/h. Normaali tilassa nopeusrajoitusmerkit näyttävät rajoitusta 80 km/h ja varoitusmerkit ovat pimeänä. (Uudenmaan tiepiiri & Traficon Oy 1998.)

Ruuhkavaroituksen näyttöä ja nopeusrajoituksen muuttamista ohjataan eksponentiaalisesti tasoitetun nopeussuureen perusteella. Nopeussuuretta päivitetään jokaisen nopeushavainnon jälkeen seuraavasti:

$$V(k) = \alpha \cdot V(v) + (1 - \alpha) \cdot V(k - 1)$$

Yhtälössä $V(k)$ on nopeussuure, kun k ajoneuvosta on saatu ilmaisu, α on viimeisimmän ajoneuvon vaikutusosuus ja $V(v)$ on viimeisimmän ajoneuvon nopeus. Nopeussuure lasketaan kaistakohtaisesti ja jokainen yksittäinen ilmaisu vaikuttaa sen arvoon. Kunkin mittauspoikkileikkauksen nopeussuureksi valitaan pienin arvo kaistakohtaisista nopeussuureista. (Uudenmaan tiepiiri & Traficon Oy 1998.)

Arvioitaessa, pitääkö nopeusrajoitusta laskea ja ruuhkavaroitusta antaa, on käytössä neljä nopeuden kynnysarvoa. Kun tutkitaan, voidaanko nopeusrajoitusta nostaa ja/tai jonovaroitus poistaa, käytetään kynnysarvoja, jotka ovat ensin mainittuja kynnysarvoja 10 km/h korkeampia. Nopeusrajoitusta lasketaan, kun jollakin kaistalla nopeustaso laskee riittävän alas, mutta nopeusrajoituksen nostamiseksi kaikkien kaistojen nopeustason täytyy olla riittävän korkea. Merkin tilaa määriteltäessä ohjelma ottaa huomioon myös muiden merkkien tilan. Hanasaaren kohdalla ohjaus perustuu nopeussuureen lisäksi liikennemäärän kynnysarvoihin. (Uudenmaan tiepiiri & Traficon Oy 1998.)

6.2 Parannusehdotus Länsiväylän liikenteen ohjausjärjestelmään

Liitteessä C on esitetty liikennemäärä-nopeushavainnot kaistoittain eri poikkileikkauksille. Pisteistöistä näkee, että erityisesti tutkimusalueen alkupää (poikkileikkaukset K06–K10) ruuhkautuu välillä pahoin. On huomattava, että pisteistöille on tyypillistä se, ettei keskinopeus välttämättä laske raja-arvon 80 km/h (korkein käytössä oleva nopeusrajoitus) alle ennen kuin virta muuttuu epävakaaksi.

Koska nopeus ei laske juurikaan ennen kuin virta muuttuu epävakaaksi eli ruuhkautuu, mittaamalla pelkkää nopeutta ei voida vielä tietää, kuinka lähellä ruuhkautumispistettä ollaan. Pisteistön yläosan voimakas hajonta on todennäköisesti seurausta erilaisista keli- ja muista ajo-olosuhteista. Tämä vaihtelu voi olla suurempaa kuin liikennemäärän aiheuttama vaihtelu.

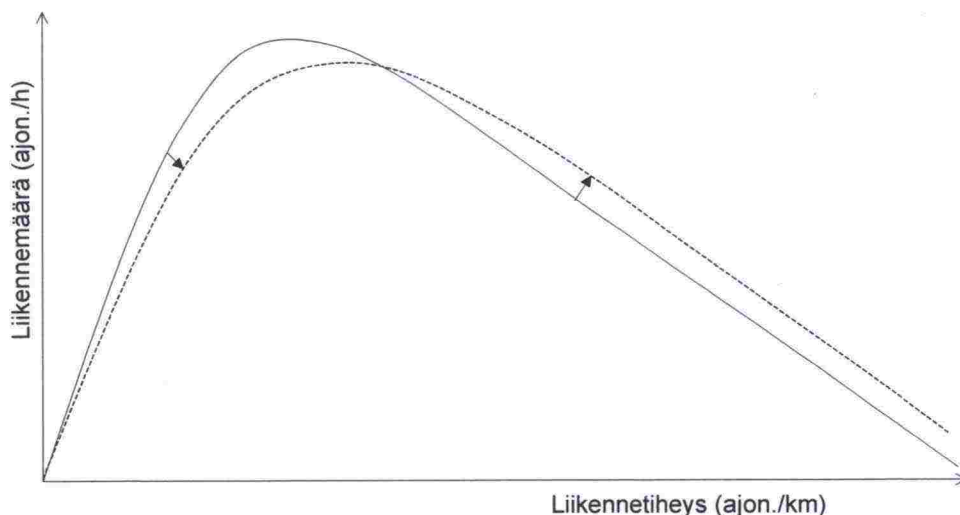
Tällä hetkellä Länsiväylän nopeusrajoituksia ohjataan sen perusteella, mikä nopeustaso tiellä kulloinkin vallitsee. Kun nopeus laskee riittävän alas, nopeusrajoituksia lasketaan ja, kun se nousee jälleen riittävän ylös, rajoitusta nostetaan. Vaikka tietyn poikkileikkauksen liikennevirta yritetäänkin sopeuttaa edellä vallitsevaan tilanteeseen, tällainen toiminta on käytännössä reaktiivista. Ohjausstrategiassa oletetaan jo lähtökohtaisesti, että liikennevirta valitsee nopeutensa nopeusrajoituksesta riippumatta keli- ja liikennetilanteen perusteella.

Kun tienkäyttäjät kokevat nopeusrajoituksen laskun oikeutetuksi, nopeuksien keskihajonta pienenee ja liikennevirran keskinopeus laskee. Tämä parantaa liikenneturvallisuutta ja sitä kautta lievittää ruuhkautumisen aiheuttamia haittoja. Aiheetta alennettu nopeusrajoitus tai annettu varoitus voivat kuitenkin johtaa heterogeenisempaan liikennevirtaan ja huonontaa järjestelmän uskottavuutta tienkäyttäjien silmissä.

Ohjausstrategian heikkous on se, ettei järjestelmä kykene ennakoimaan ruuhkan syntymistä. Järjestelmä reagoi vasta sitten, kun nopeustaso on jo laskenut ja ruuhka päässyt syntymään. Koska jo syntyneen ruuhkan purkamiseen vaadittava liikennemäärän lasku on suurempi kuin ruuhkan aiheuttanut liikennemäärän kasvu, tällainen strategia ei voi olla optimaalinen.

Kun järjestelmän tavoitteena on lievittää ruuhkautumisen aiheuttamia haittoja, olisi parasta, jos järjestelmä ennakoisi liikennevirran ruuhkautumisen ja yrittäisi ehkäistä sitä. Sen sijaan, että nopeusrajoituksia ainoastaan sopeutettaisiin vallitsevaan tilanteeseen, olisi parempi, että niillä yritettäisiin aktiivisesti pienentää ruuhkautumisen riskiä.

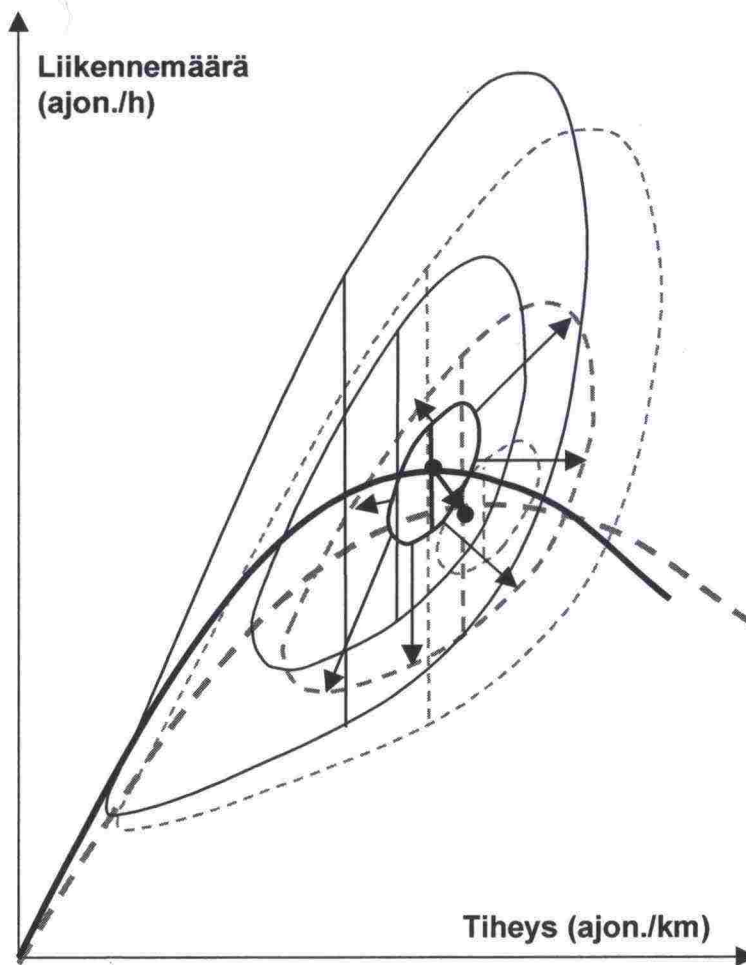
Palautetaan mieliin Cremerin häiriöherkkyysanalyysi luvusta 4.2. Cremerin (1979) mukaan liikennevirta kestää sitä pienempiä häiriöitä, mitä lähempänä kriittistä liikennetiheyttä ollaan. Tarkastellaan, miten eri nopeusrajoituksilla määritetyt liikennetiheys-liikennemääräkuvaajat (liite C) eroavat toisistaan. Nopeusrajoituksella 70 km/h kuvaajan nousevan osion kulmakerroin on selvästi pienempi kuin nopeusrajoituksella 80 km/h. Lisäksi kuvista voi havaita, että kuvaajan lakipiste laskee ja siirtyy oikealle sitä mukaa, kun nopeusrajoitus laskee. Yksinkertaistettuna kuvaajamuutos on siis kuvan 17 mukainen.



Kuva 17. Periaatteellinen liikennetiheys-liikennemääräkuvaaja kahdella eri nopeusrajoituksella. Yhtenäinen viiva kuvaa ylempää ja katkoviiva alemmaa nopeusrajoitusta.

Kun nopeusrajoitus laskee, liikennevirran keskinopeus laskee. Nopeus on liikennemäärän ja liikennetiheyden osamäärä. Kysymys kuuluukin, mitä tapahtuu liikennemäärälle ja liikennetiheydelle. Heijastuuko nopeuden lasku liikennemäärän laskuna, liikennetiheyden kasvuna vai molempina? Jos liikennemäärä pienenee nopeuden laskun takia ja liikennetiheys (keskimääräinen etäisyys edellä ajavaan) pysyy samana, siirrytään nopeusrajoitusmuutoksen hetkellä käyrältä toiselle liikennemääräakselin suunnassa. Jos taas muutos tapahtuu liikennetiheydessä, siirtymä tapahtuu liikennetiheysakselin suunnassa. Tämä ei kuitenkaan ole mahdollista silloin, kun liikennetiheys on lähellä maksimiaan. Todennäköisesti ensimmäinen vaihtoehto on siis lähempänä totuutta. Jos siirtymää ilmenee liikennetiheysakselin suunnassa, se on luultavasti pienempää kuin liikennemääräakselin suuntainen siirtymä.

Oletetaan, että nopeusrajoituksen laskun yhteydessä siirrytään ylemmältä käyrältä alemmalle joko aivan pystysuoraan tai hieman oikealle siirtyen. Tällaisessa tilanteessa havaitaan, että Cremerin (1979) mukaisen häiriön sietoalueen koko kasvaa eli liikennevirran häiriöherkkyys ja ruuhkaantumisen riski pienenevät (kuva 18).



Kuva 18. Periaatteellinen kuva Cremerin (1979) häiriön sietoalueet kahdella eri nopeusrajoituksella.

Hyvä strategia siis olisi, että kun virta tulee ennalta määritettyä riskirajaa häiriöherkemmäksi, nopeusrajoituksia lasketaan, jolloin häiriöiden riski saadaan pienemmäksi. Vastaavasti nopeusrajoitusta voidaan nostaa, kun arvioidaan, että häiriintymisen riski on ylemmällä nopeusrajoituksella riittävän pieni.

Ohjausalgoritmia olisi myös hyvä kehittää siten, että siinä otettaisiin kelitiedot huomioon. Tällöin eri kelityypeille (ainakin talven liukkaimmille keleille ja rankimmille vesisateille) voitaisiin tehdä omat kuvaajat, joille riskirajat voitaisiin määritellä.

6.3 Ruuhkaantumisen ja ruuhkan riski

Tutkitaan Länsiväylän liikennevirran ruuhkautumisherkkyttä. Jaetaan ruuhka kahteen osaan: jonoutuneeseen ja hitaaseen liikenteeseen. Tiehallinnon sujuvuusluokituksen mukaisesti jonoutunut liikenne tarkoittaa liikennevirtaa, jonka keskinopeus on 75–90 prosenttia vapaasta nopeudesta, ja hidas liikenne virtaa, jonka keskinopeus on 25–75 prosenttia vapaasta nopeudesta (taulukko 3). Tieosan vapaaksi nopeudeksi voidaan arvioida noin 90 km/h (liite C). Määritelmän mukaisesti liikenne on jonoutunutta, jos keskinopeus on alle 80 km/h, ja hidasta, jos keskinopeus on alle 65 km/h.

Laajennetaan kriteerejä siten, että määritetään liikennevirta jonoutuneeksi myös siinä tapauksessa, että alle sekunnin nettoaikavälien osuus on yli 20 prosenttia. Tienpitäjän näkökulmasta alentuneen sujuvuuden lisäksi alentunut turvallisuus on toinen syy ohjata liikennevirtaa. Liikenne tulkitaan edellä mainituista kriteereistä huolimatta sujuvaksi, jos liikennemäärä on alle 150 ajon./h/kaista, jotteivät yön hiljaiset hetket sotke tuloksia.

Ruuhkariskillä tarkoitetaan riskiä, että liikennevirta on tietyllä hetkellä tai tietyissä olosuhteissa jonoutunut tai hidastunut. Ruuhkaantumisriski on vastavasti riski, että jonoutuneen tai hidastuneen liikenteen kriteerit täyttyvät seuraavan viiden minuutin aikana.

Tarkastellaan ruuhkautumista ja ruuhkaa erilaisten ajankohtaa ja liikennetilannetta kuvaavien olosuhteiden funktiona. Tällöin ruuhkautumisriski tai odotettavissa olevan ruuhkan vakavuus voidaan määrittää vallitsevien olosuhteiden perusteella. Moni seikka vaikuttaa ruuhkaan ja sen laatuun, jolloin erilaiset riskit yhdistämällä saadaan aikaan kokonaiskuva tulevista olosuhteista.

Ruuhkautumisen riski voidaan määrittää esimerkiksi kellonajan, viikonpäivän, liikennemäärän, keskinopeuden, nopeuden keskihajonnan ja kelin funktiona. Kellonaika ja viikonpäivä eivät kriteereinä ota huomioon hetkellistä vaihtelua, vaan kuvaavat ajankohtaa keskimäärin. Liikennemäärä, keskinopeus ja nopeuskeskihajonta kuvaavat juuri sen hetken liikennetilaa eli tuovat kuvioon mukaan hetkellisen vaihtelun, mutteivät yksin riitä. Esimerkiksi, jos tiellä on tietyt liikenneolosuhteet (liikennemäärä, nopeus, nopeuskeskihajonta) sunnuntai-iltapäivänä, on odotettavissa todennäköisesti erilainen (eri mittainen ja vakavuudeltaan erilainen) ruuhka, kuin jos samat olosuhteet mitataan arkiaamuna tyypilliseen ruuhkan alkamisaikaan. Keli kuvaa ulkoisia liikennekäyttäytymiseen vaikuttavia olosuhteita.

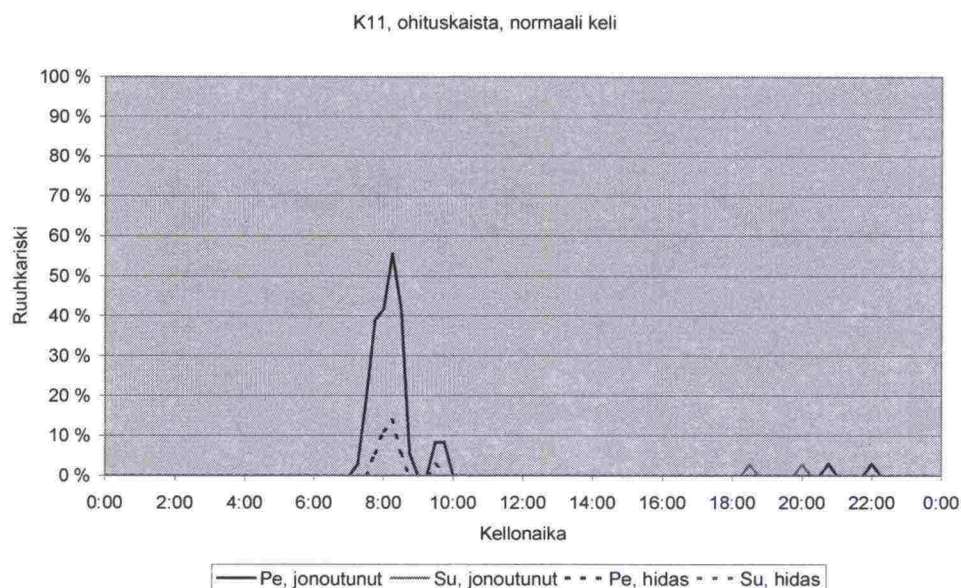
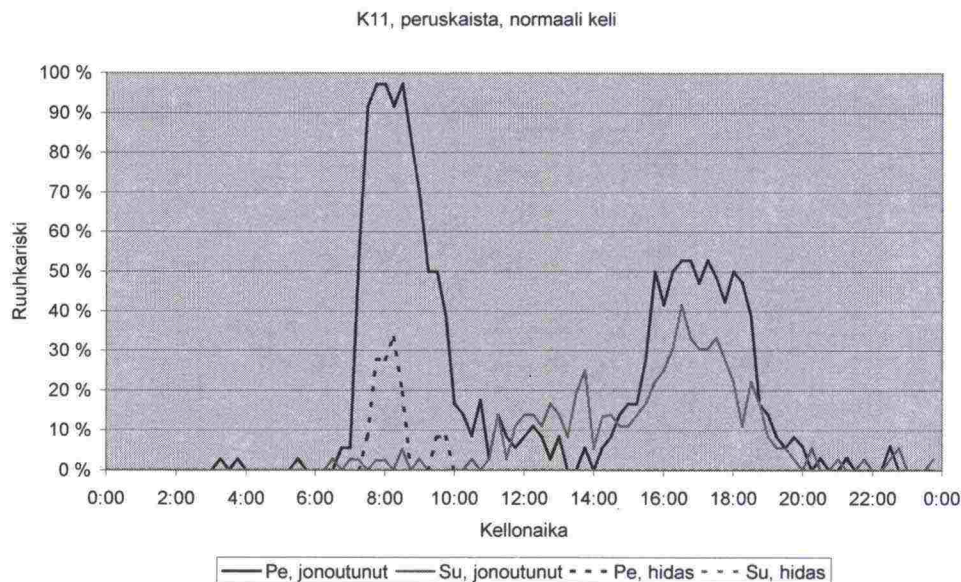
Oletuksena on, ettei mikään olosuhderyhmä (ajankohtaan, liikennetilanteeseen tai ulkoihin olosuhteisiin liittyvä) riitä yksinään kuvaamaan ruuhka- tai ruuhkautumisriskiä, vaan riittävän kokonaiskuvan saamiseksi, tilannetta on tarkasteltava kokonaisuutena.

Keli jaetaan kolmeen luokkaan: normaaliin keliin sekä tilanteisiin, joissa annetaan kelivaroitus tai -hälytys. Luokittelu perustuu Uudenmaan tiepiiriin keliin perustuviin liikenteen ohjausperiaatteisiin. Kelivaroitus määriteltiin annetuksi, jos näkyvyys on 150–299 metriä tai keskituulen nopeus on 12–16,9 m/s. Vastaavasti kelihälytys annetaan, jos molemmilla kaistoilla on lunta tai jäätä ja sen lisäksi tien pinnan lämpötila on jommallakummalla kaistalla alle +2 °C, jos näkyvyys on alle 150 metriä, jos keskituulen nopeus on yli 16,9 m/s tai jos on runsasta sadetta ja tie on märkä tai märkä ja suolattu.

Kelin lisäksi myös valaistusolosuhteet vaikuttavat liikenteeseen. Valaistusolosuhteiden ottaminen huomioon on kuitenkin hankalaa, koska niihin vaikuttaa auringon paistamissuunnan ja korkeuden lisäksi pilvisuus. Suureen johtaminen ei siis onnistu tiesääaineiston pohjalta.

Tarkastellaan ruuhkaantumisen ja ruuhkan riskiä esimerkkinä poikkileikkauksessa K11 perjantaisin ja sunnuntaisin, kun keli on normaali. Kuvaajat perustuvat vuonna 1999 kerättyyn aineistoon. Peruskaistalla on kysynnässä havaittavissa perjantaisin selkeästi sekä aamu- että iltahuippu, ohituskais-talla ainoastaan aamuhuippu (kuva 19). Perjantaina jonoutuminen alkaa

molemmilla kaistoilla aamulla noin kello 7 ja kestää peruskaistalla noin kello 10:een, ohituskaistalla tunnin lyhyempään. Peruskaistan iltahuippu alkaa perjantaisin noin kello 15:n aikaan ja kestää kello 19:ään.



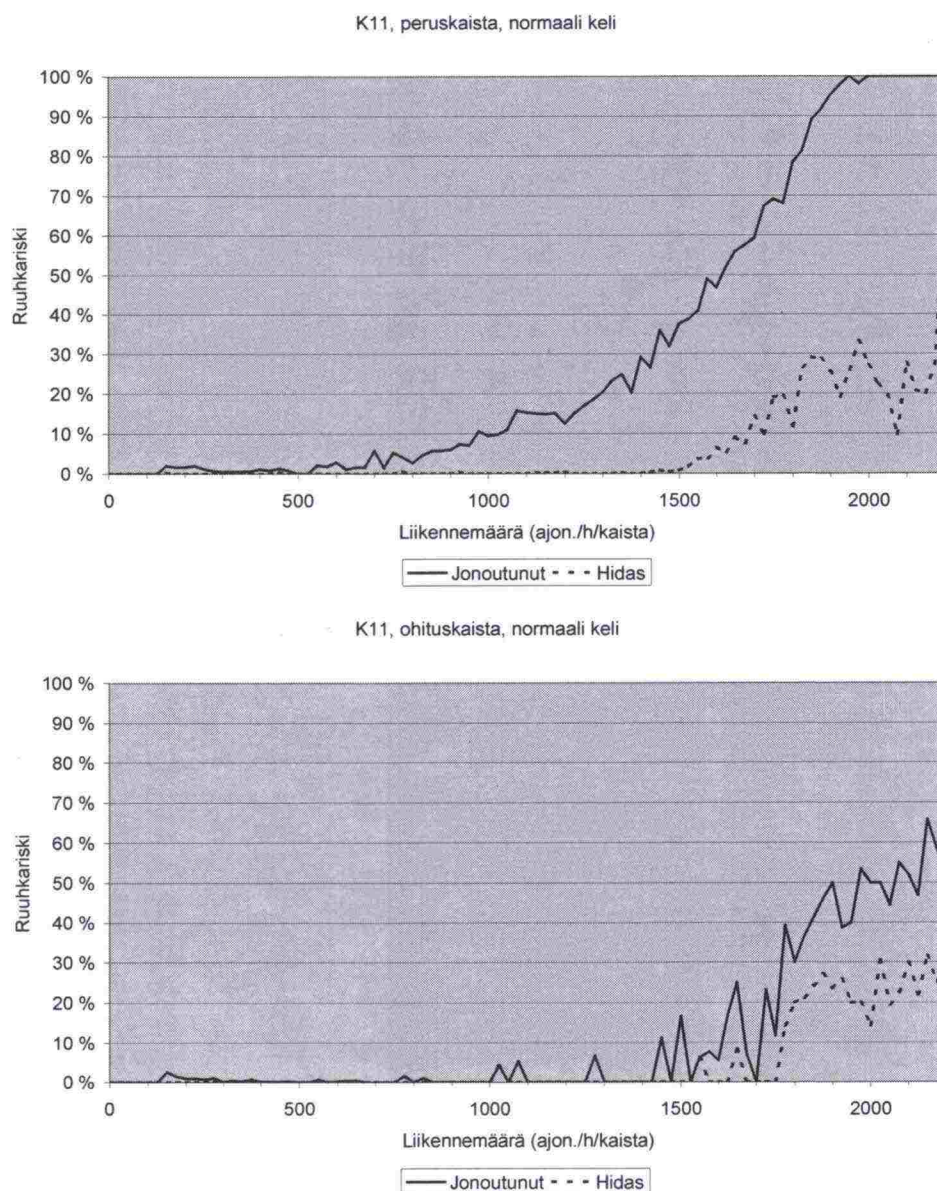
Kuva 19. Jonoutuneen ja hitaan liikenteen riski kaistoittain kellonajan funktiona perjantaisin ja sunnuntaisin normaalilla kelillä poikkileikkauksen K11 kohdalla Helsingin suunnalla.

Peruskaistalla aamuinen liikenteen jonoutuminen on käytännössä joka perjantainen ilmiö, peruskaistan liikenteen jonoutuminen illalla ja ohituskaistan aamulla tapahtuvat suunnilleen joka toinen perjantai (kuva 19). Hitaan liikenteen kriteerit täyttyvät perjantaisin molemmilla kaistoilla ainoastaan kysynnän aamuhuipun aikaan, noin kello 7:30–9:00. Liikennevirta muuttuu hitaaksi selkeästi harvemmin, kuin mitä se jonoutuu.

Sunnuntaiden kysyntähuiput eivät ole yhtä säännöllisiä kuin perjantaiden huiput (kuva 19). Sunnuntaisin jonoutumista ilmenee yleensä ainoastaan pe

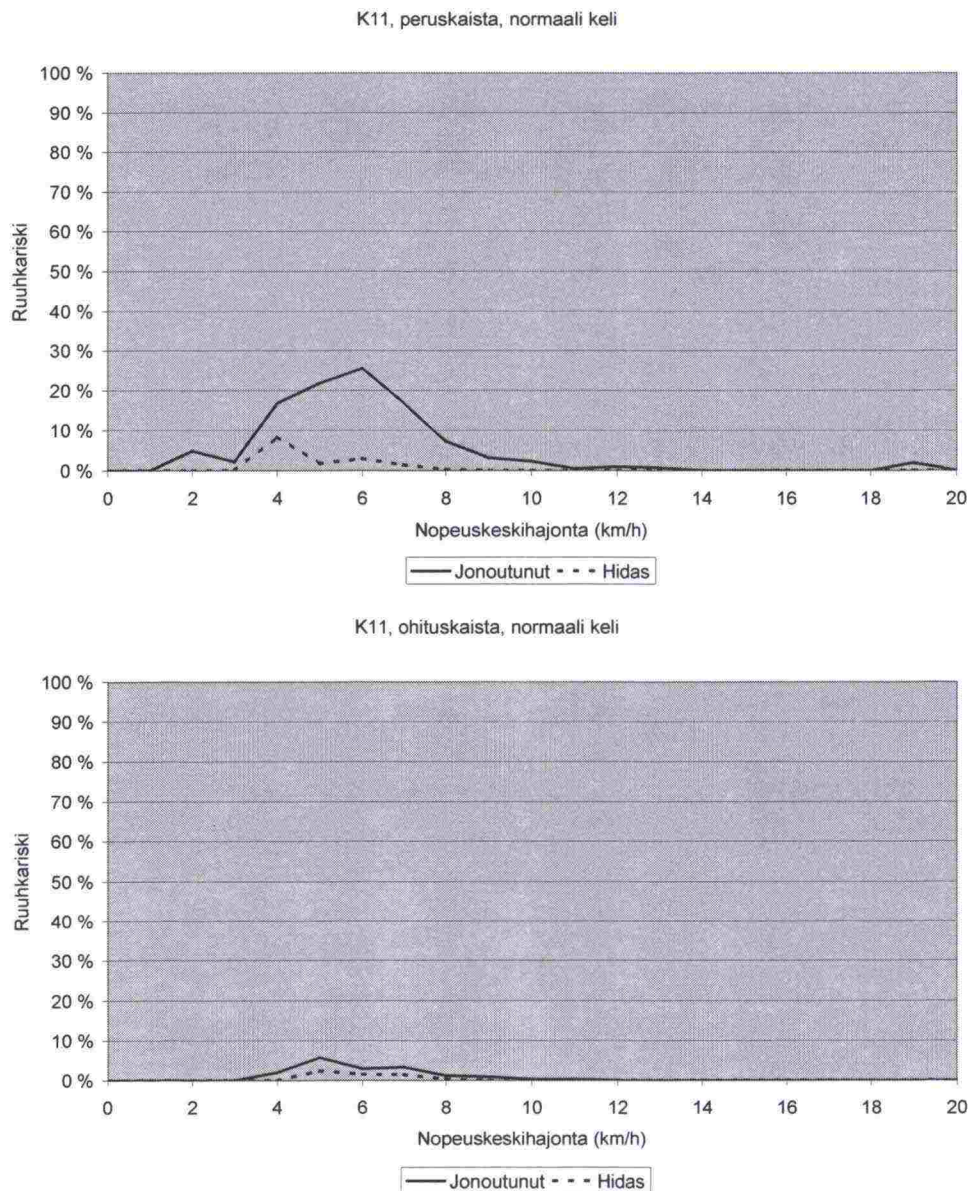
ruskaistalla. Sunnuntaiden aamupäivähuiput ilmenevät yleensä kello 11–14 ja iltapäivähuiput kello 15–19. Sunnuntaisin iltapäivähuippu on todennäköisempi kuin aamupäivähuippu.

Mitä suurempi on kaistan liikennemäärä, sitä todennäköisemmin liikenne on ruuhkaista (kuva 20). Peruskaistalla liikennemäärä, joka normaalilla kelillä liittyy jonoutuneeseen liikenteeseen, on selkeästi pienempi kuin se liikennemäärä, joka liittyy hitaaseen liikennevirtaan. Jonoutuneen liikenteen riski alkaa kasvaa jo liikennemäärästä 500 ajon./h/kaista lähtien, kun taas hitaan liikenteen riski alkaa kasvaa vasta liikennemäärän 1 500 ajon./h/kaista jälkeen. Ohituskaistalla molemmat riskit alkavat kasvaa suunnilleen liikennemäärän 1 500 ajon./h/kaista jälkeen, mutta hitaan liikenteen riski on pienempi kuin jonoutuneen liikenteen riski.



Kuva 20. Jonoutuneen ja hitaan liikenteen riski kaistoittain liikennemäärän funktiona normaalilla kelillä poikkileikkauksen K11 kohdalla Helsingin suunnalla.

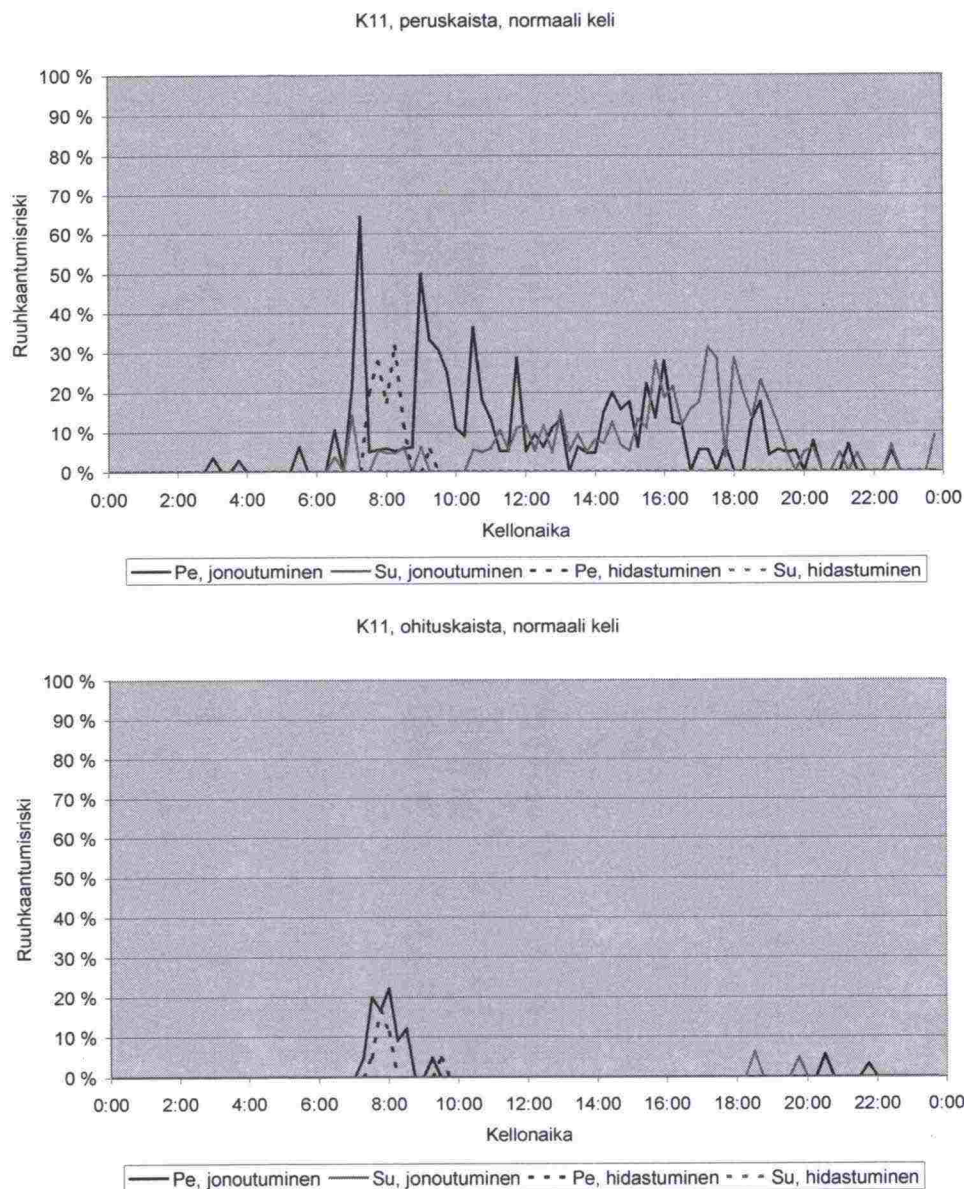
Jonoutunut liikennevirta liittyy normaalilla kelillä useimmiten nopeuden keskijajontaan 3–9 km/h (kuva 21). Peruskaistalla ruuhkan ja nopeuskeskijajonnan välinen korrelaatio on voimakkaampi kuin ohituskaistalla.



Kuva 21. Jonoutuneen ja hitaan liikenteen riski kaistoittain nopeuden keskijajonnan funktiona normaalilla kelillä poikkileikkauksen K11 kohdalla Helsingin suunnalla.

Jonoutumisen riski kasvaa normaalilla kelillä sujuvassa liikenteessä perjantaimuisin selkeästi kello 7:n jälkeen ja laskee voimakkaasti kello 7:30:n aikaan (kuva 22). Riski pysyy alhaisena noin kello 9:ään asti ja vaihtelee tämän jälkeen voimakkaasti noin kello 17:ään asti. Perjantaisin hidastumisen riski on olemassa jonoutuneessa tai sujuvassa liikennevirrassa molemmilla kaistoilla aamuisin kello 7–9, samoin jonoutumisen riski sujuvassa liikenteessä ohituskaistalla.

Sunnuntaisin jonoutumisen riski nousee noin 10 prosentin tasolle peruskaistalla sujuvassa liikennevirrassa aamulla kello 10:n jälkeen ja noin 20 prosenttiin kello 15:n aikaan iltapäivällä (kuva 22). Jonoutumisen riski laskee hyvin alhaiseksi illalla kello 20:een mennessä. Ohituskaistalla ruuhkaantumisen riski on sunnuntaisin lähes olematon.

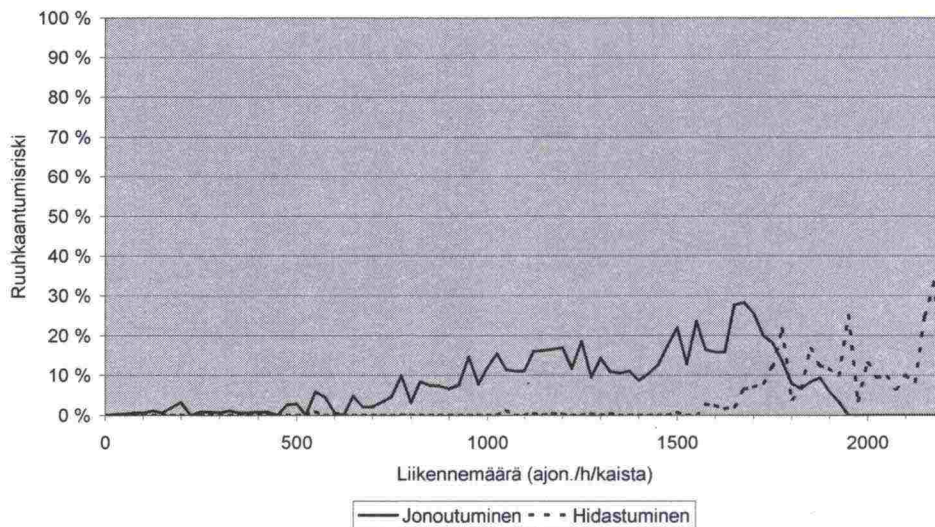


Kuva 22. Jonoutumisen ja hidastumisen riski kaistoittain kellonajan funktiona normaalilla kelillä perjantaisin ja sunnuntaisin poikkileikkauksen K11 kohdalla Helsingin suunnalla.

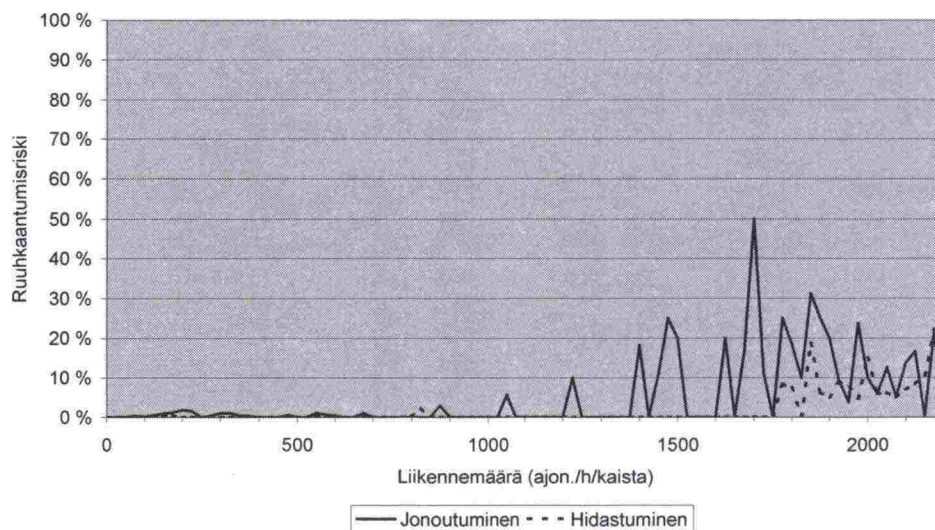
Peruskaistalla on selkeästi havaittavissa, kuinka sujuvalla liikenteellä on riski jonoutua, jos liikennemäärä on normaalilla kelillä noin 700–1 900 ajon./h/kaista, ja sujuvalla tai jonoutuneella liikenteellä on riski hidastua, jos liikennemäärä ylittää arvon 1 600 ajon./h/kaista (kuva 23). Ohituskaistalla jonoutumisen riski alkaa kasvaa noin liikennemäärän 1 600 ajon./h/kaista jälkeen ja hidastumisen riski liikennemäärän 1 750 ajon./h/kaista jälkeen. Kun liiken-

nemäärä on ohituskaistalla suurempi kuin 1 900 ajon./h/kaista, jonoutumisen ja hidastumisen riskit ovat suunnilleen yhtä suuret.

k11, peruskaista, normaali keli

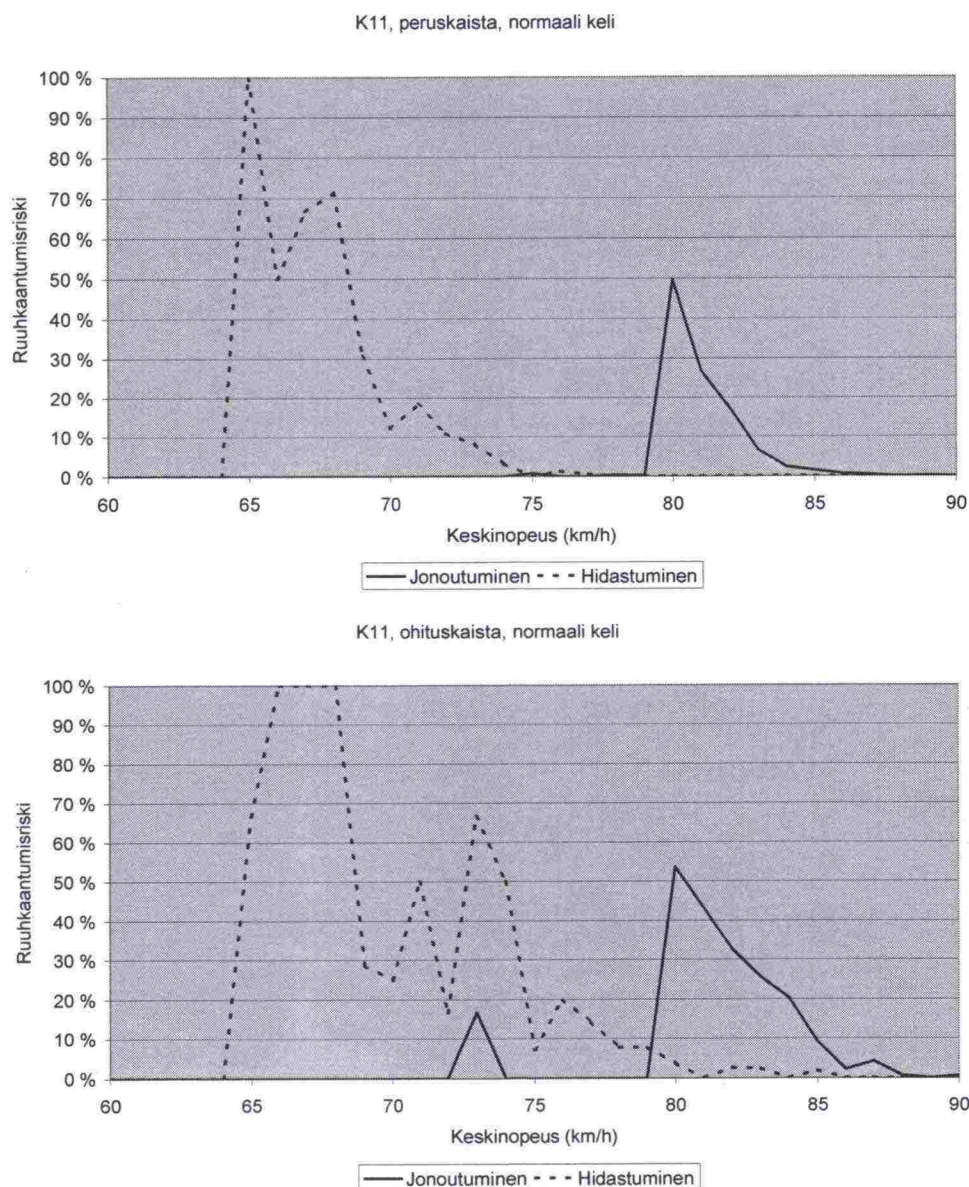


K11, ohituskaista, normaali keli



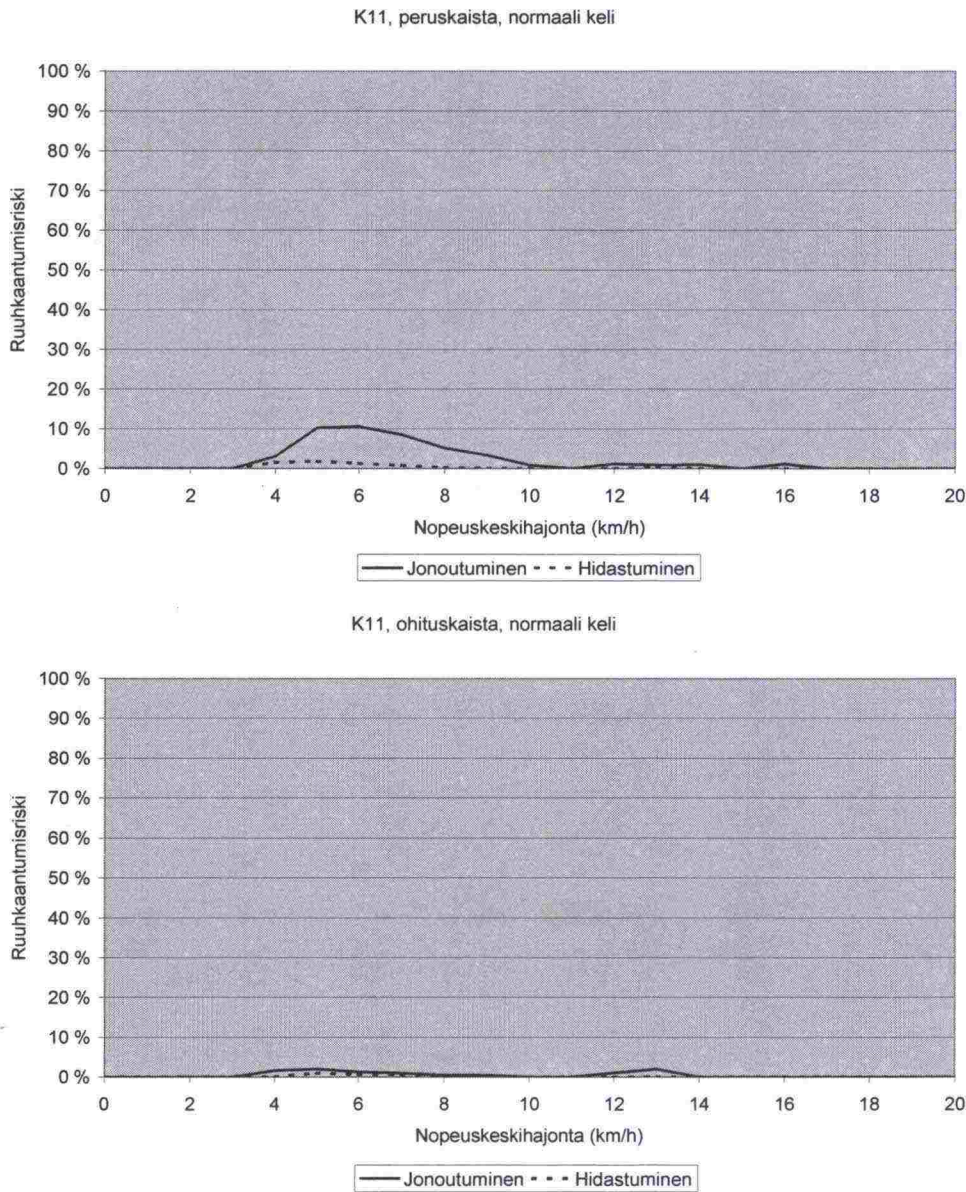
Kuva 23. Jonoutumisen ja hidastumisen riski kaistoittain liikennemäärän funktiona normaalilla kelillä poikkileikkauksen K11 kohdalla Helsingin suunnalla.

Jos keskinopeus laskee normaalilla kelillä kummalla tahansa kaistalla alle 68 km:iin/h, liikenteen riski muuttua hitaaksi on hyvin suuri (kuva 24). Hieman jonoutuneen liikenteen raja-arvon 80 km/h yläpuolella ovat nopeudet johtavat alle puolissa tapauksista jonoutuneeseen liikenteeseen. Jos keskinopeus on yli 85 km/h, jonoutumisen riski seuraavalle viidelle minuutille on erittäin pieni.



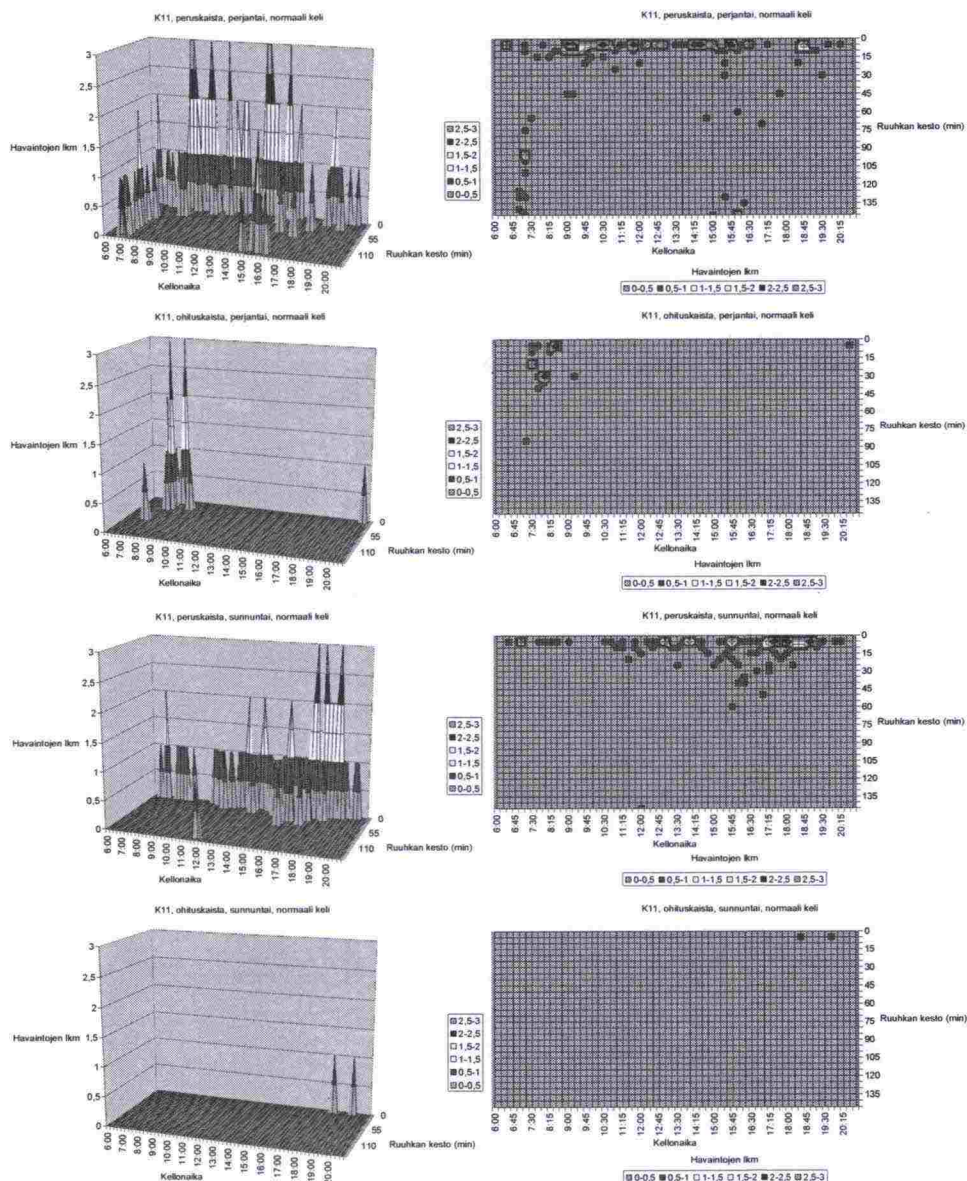
Kuva 24. Jonoutumisen ja hidastumisen riski kaistoittain nopeuden funktiona normaalilla kelillä poikkileikkauksen K11 kohdalla Helsingin suunnalla.

Ohituskaistalla jonoutumisen tai hidastumisen riski on normaalilla kelillä kaikilla nopeuden keskihajonnoilla lähellä nollaa (kuva 25). Peruskaistalla jonoutumisen riski kasvaa sujuvassa liikenteessä, kun nopeuden keskihajonta ylittää raja-arvon 4 km/h, ja laskee nopeuden keskihajontaan 10 km/h mennessä. Suurten keskihajontojen pieni ruuhkaantumisriski johtuu siitä, että suurimmat keskihajonnat liittyvät usein pieniin liikennemääriin ja ruuhkan määritelmässä oli liikennemäärän minimikriteerinä 150 ajon./h/kaista.



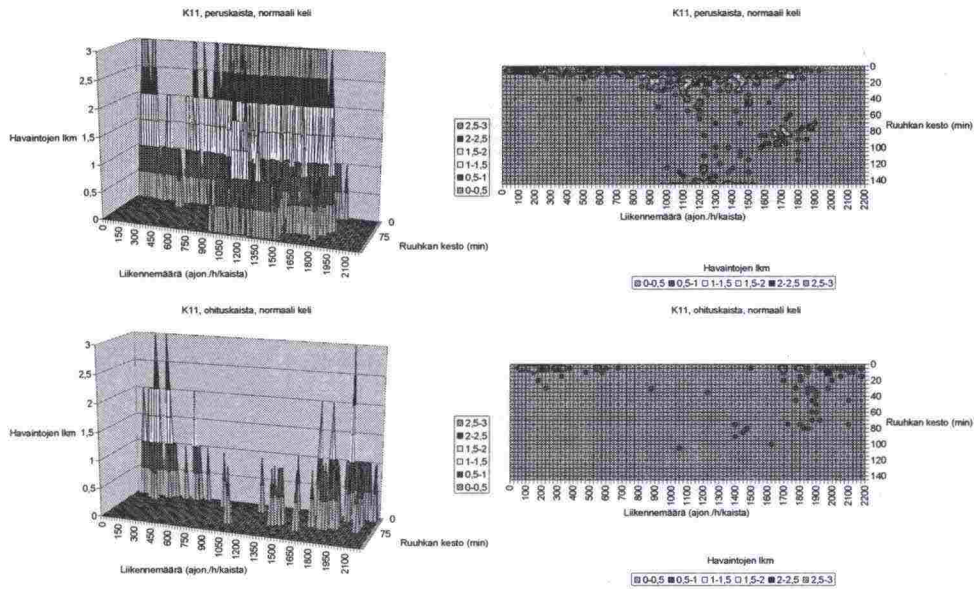
Kuva 25. Jonoutumisen ja hidastumisen riski kaistoittain nopeuden keskihajonnan funktiona normaalilla kelillä poikkileikkauksen K11 kohdalla Helsingin suunnalla.

Kuvasta 26 nähdään, että jos liikenne jonoutuu perjantaina kysynnän aamutai iltahuipun aikaan, on odotettavissa pisimmät ruuhkat. Päiväliikenteessä, jossa jonoutumisen riski oli paikoitellen kohtalainen, odotettavissa on erittäin lyhyitä ruuhkia. Sunnuntaisin jonoutumiset ovat selvästi lyhytkestoisempia kuin perjantain pisimmät ruuhkat, mutta jonoutumisen sattuessa päiväliikenteessä liikenteen sujuvaksi palautuminen kestää sunnuntaisin kauemmin kuin perjantaisin vastaavaan aikaan. Ohituskaistan ruuhkien kestot ylittävät puoli tuntia ainoastaan perjantaaamuisin. Sunnuntaisin ohituskaistan ruuhkat ovat erittäin lyhytkestoisia.

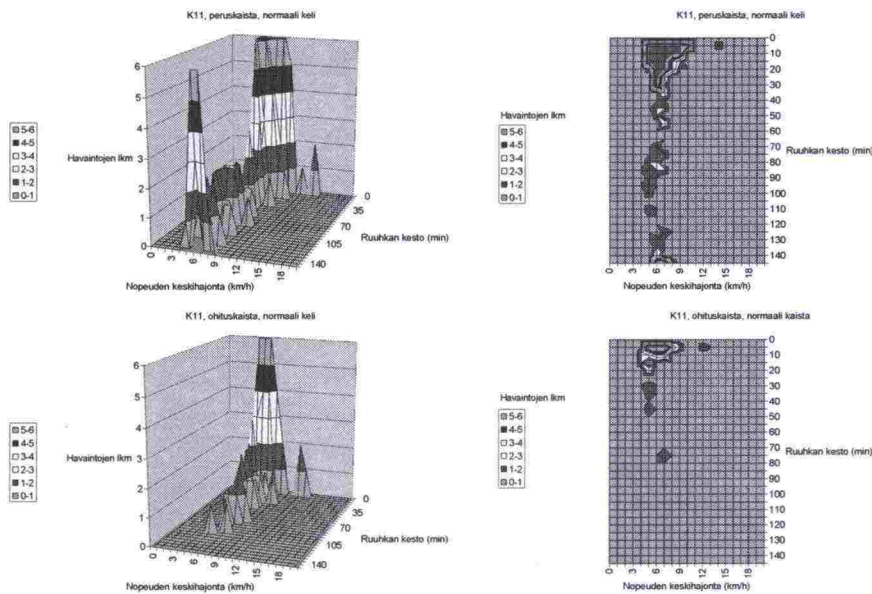


Kuva 26. Jonoutumisen keston riski kaistoittain kellonajan funktiona normaalilla keliällä perjantaisin ja sunnuntaisin olettaen, että ruuhka alkaa seuraavan viiden minuutin aikana poikkileikkauksen K11 kohdalla Helsingin suunnalla.

Yli puolen tunnin mittaisen ruuhkan riski kasvaa vasta, kun kaistan liikennemäärä ylittää arvon 950 ajon./h/kaista (kuva 27). Ruuhkaantumiset tapahtuvat niin kapealla nopeuskeskihajonnan vaihteluvälillä, ettei ruuhkan kestoa voi arvioida nopeuskeskihajonnan avulla (kuva 28).



Kuva 27. Jonoutumisen keston riski kaistoittain liikennemäärän funktiona normaalilla kelillä olettaen, että ruuhka alkaa seuraavan viiden minuutin aikana poikkileikkauksen K11 kohdalla Helsingin suunnalla.



Kuva 28. Jonoutumisen keston riski kaistoittain nopeuden keskihajonnan funktiona olettaen, että ruuhka alkaa seuraavan viiden minuutin aikana poikkileikkauksen K11 kohdalla Helsingin suunnalla.

6.4 Ruuhkan ennakointi

Tutkitaan tarkemmin poikkileikkauksen K11 peruskaistan ruuhkaantumista perjantaisin normaalilla kelillä. Edellä esitetyistä kuvista voi havaita, että ruuhka on hyvin erilaista vuorokauden eri aikoina (kuvat 19, 22 ja 26). Vuorokausi voidaan jakaa karkeasti kuuteen eri osaan:

- aamuhuipun alku (kello 7:00–7:30)
- aamuhuippu (kello 7:30–10:00)
- päiväliikenne (kello 10:00–14:30)
- iltahuipun alku (kello 14:30–16:30)
- iltahuippu (kello 16:30–19:30)
- ilta- ja yöliikenne (kello 19:30–7:00).

Kysynnän aamuhuipun alussa (kello 7:00–7:30) liikennemäärä on suuri (tyypillisesti 1 100–1 800 ajon./h/kaista) ja ruuhkaantuminen tavallista. Jos ruuhka alkaa tähän aikaan, se on yleensä pitkäkestoinen. Ruuhkista 85 prosenttia oli kestoltaan yli tunnin mittaisia.

Aamuhuipun aikaan (kello 7:30–10:00) liikennemäärä pysyy suurena (tyypillisesti 1 300–2 100 ajon./h/kaista) ja liikenne on ruuhkautunutta (ruuhkan todennäköisyys 74 prosenttia). Ruuhka on yleensä alkanut jo aikaisemmin, mutta aamuhuipun lopulla ruuhka saattaa välillä helpottaa ja alkaa lyhytkestoisena uudestaan. Tähän aikaan alkaneista ruuhkista 88 prosenttia on kestoltaan korkeintaan 15 minuuttia.

Päiväliikenteessä (kello 10:00–14:30) liikennemäärä on yhä melko suuri (tyypillisesti 1 100–1 500 ajon./h/kaista), mutta ruuhka on suhteellisen harvinaisen ilmiö. Jos ruuhkan kriteerit täyttyvät, ruuhka on lähes aina hyvin lyhyt. Ruuhkista 82 prosenttia kestää 5 minuuttia ja 94 prosenttia korkeintaan 15 minuuttia.

Kysynnän iltahuippu ei ole ilmiönä yhtä aikaan sidottu ja selkeä kuin aamuhuippu. Iltapäivällä (kello 14:30–16:30) liikennemäärä kasvaa hieman päiväliikenteestä (tyypillisesti 1 200–1 700 ajon./h/kaista) ja ruuhka on melko yleinen ilmiö. Tähän aikaan alkaneet ruuhkat ovat kuitenkin suurelta osin suhteellisen lyhyitä, mutta pitkiäkin ruuhkia esiintyy. Ruuhkista 64 prosenttia on kestoltaan korkeintaan 10 minuuttia pitkiä, mutta 28 prosenttia kestää vähintään tunnin.

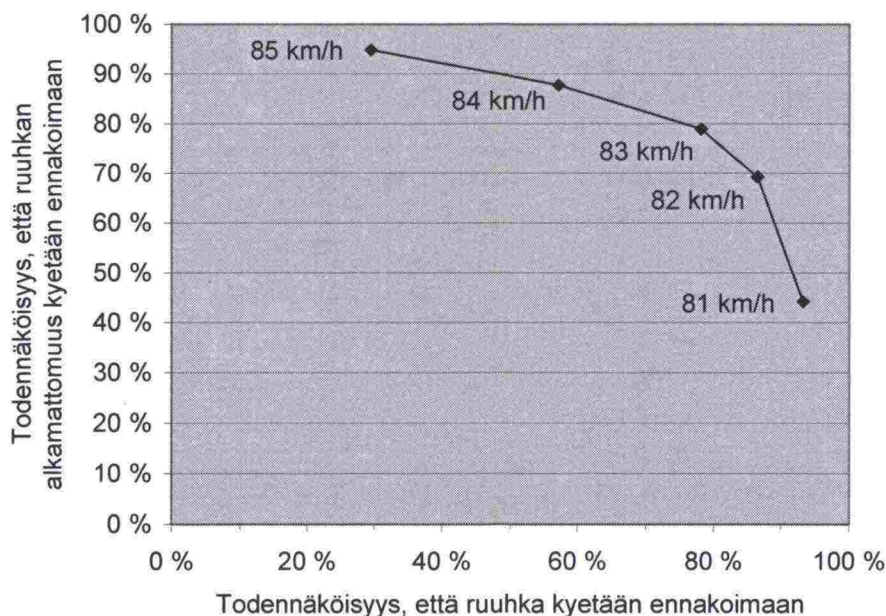
Iltahuipun aikaan (kello 16:30–19:30) liikennemäärä on kohtalainen (tyypillisesti 900–1 600 ajon./h/kaista) ja ruuhka on suhteellisen yleinen ilmiö. Ruuhkat ovat kuitenkin lyhytkestoisempia kuin aamulla. Tähän aikaan alkaneista ruuhkista 69 prosenttia kestää korkeintaan 10 minuuttia. Yli tunnin mittaisten ruuhkien osuus on 8 prosenttia.

Ilta- ja yö liikenteessä (kello 19:30–7:00) liikennemäärä on pieni (tyypillisesti alle 900 ajon./h/kaista) ja ruuhka on ilmiönä harvinaisen. Tähän aikaan ruuhkakriteerien täyttyminen merkitsee yleensä sitä, että keskinopeus laskee tai lyhyiden aikavälien osuus kasvaa hetkellisesti alle/yli raja-arvon. Ruuhkista 89 prosenttia kestää 5 minuuttia ja loput 11 prosenttia 10 minuuttia.

Erittäin lyhytkestoiisiin jonoutumisiin, jotka selviävät itsestään alle 15 minuutissa, ei ole aivan välttämätöntä puuttua ohjauksella. On tärkeämpää, että kysynnän aamu- ja iltahuipun pitkät ruuhkat osataan ennakoida ja niihin osataan varautua ajoissa.

Kuvassa 29 ja taulukossa 10 on tarkasteltu ohjauksen hyvyttä erilaisilla pelkkään nopeuteen perustuvilla ohjauskriteereillä. Ohjauskriteerit pitäisi valita siten, että ne ovat riittävän herkkiä (havaitsevat mahdollisimman suuren osan ruuhkista), mutteivät aiheuta liikaa virrehälytyksiä (ennakoivat ruuhkaa mahdollisimman harvoin silloin, kun ruuhka ei ole alkamassa). Yleensä vir

hehálytysten määrä kasvaa, kun havaitsemisherkkyys paranee, ja pienenee, kun havaitsemisherkkyys huononee. Parhaaksi kriteeriksi valitaankin sellainen, joka on mahdollisimman lähellä optimitilannetta (kaikki ruuhkat havaitaan eikä virrehálytyksiä tehdä). Nopeuskriteereistä parhaaksi osoittautui raja-arvo 83 km/h.



Kuva 29. Keskinopeuteen perustuvien ohjauskriteerien hyvyys perjantailiikenteessä Länsiväylällä.

Taulukko 10. Todennäköisyys, että ruuhkaantumisen tulee ennakoitua oikein erilaisilla keskinopeuteen perustuvilla kriteereillä. Etäisyys optimista kertoo kriteerin hyvyyden.

Todennäköisyys	Kriteeri				
	81 km/h	82 km/h	83 km/h	84 km/h	85 km/h
ennakoida ruuhkan alku	29 %	57 %	78 %	87 %	93 %
ennakoida yli 15 min kestävä ruuhkan alku	58 %	91 %	100 %	100 %	100 %
olla ennakoidamatta ruuhkaa, kun sellainen ei ala	95 %	88 %	79 %	69 %	44 %
Etäisyys optimista	0,71	0,45	0,30	0,34	0,56

Perjantapäivän eri osille on haettu liikennemäärään, keskinopeuteen, nopeuskeskihajontaan ja pienten aikavälien osuuteen perustuvat kriteerit (taulukko 11). Kriteerit ovat normaalille kelille. Kriteerissä 1 on pyritty havaitsemaan kaikki ruuhkat ja kriteerissä 2 on keskitytty yli 15 minuutin mittaisiin ruuhkiin. Öisin ei ollut lainkaan yli 10 minuutin ruuhkia ja lyhyet ruuhkautumiset olivat hyvin satunnaisia, joten yöliikenteelle ei kehitetty ruuhkakriteerejä lainkaan. Vertailukohtana on edellä parhaaksi määritetty pelkkään keskinopeuteen perustuva kriteeri 83 km/h.

Taulukko 11. Kriteerejä ruuhkan ennakoimiseen.

		Liikenne- määrä	Keski- nopeus	Nopeus- keskihajonta	Lyhyiden aika- välien osuus
Aamuhuipun alku	Kriteeri 1	> 1 090	< 82,8	< 7,8	< 0,06
	Kriteeri 2	Sama kuin kriteeri 1			
Aamuhuippu	Kriteeri 1	> 1 200	< 82,5	< 8,0	< 0,05
	Kriteeri 2	> 1 300	< 81,6	< 7,4	< 0,02
Päivä- liikenne	Kriteeri 1	> 1 030	< 83,7	6,3–8,9	< 0,08
	Kriteeri 2	> 1100	< 80,8	6,3–7,5	0,01–0,08
Iltahuipun alku	Kriteeri 1	> 1 150	< 82,7	< 8,5	< 0,06
	Kriteeri 2	> 1 200	< 81,4	< 8,5	< 0,05
Iltahuippu	Kriteeri 1	> 850	< 82,1	6,3–9,4	< 0,05
	Kriteeri 2	> 970	< 81,3	6,3–7,3	< 0,05

Kysynnän aamu- ja iltahuipun sekä näiden alkujen aikana yhdistelmäkriteerit 1 johtavat parempiin tuloksiin kuin pelkkään nopeusraja-arvoon perustuva ennakointi (taulukko 12). Yhdistelmäkriteerit 1 eivät ennako aamuhuipun ruuhkien alkua aina aivan yhtä hyvin kuin pelkkä nopeuskriteeri, mutta ne johtavat selvästi harvemmin virheellisiin ruuhkaantumisvaroituksiin kuin pelkkä nopeuskriteeri. Iltahuipun ruuhkaantumiset tulevat ennakoiduiksi molemmilla kriteereillä yhtä hyvin, mutta yhdistelmäkriteeri 1 aiheuttaa huomattavasti vähemmän vääriä hälytyksiä kuin pelkkä nopeuskriteeri.

Päiväliikenteessä yhdistelmäkriteeri 1 johtaa yhtä hyvään tulokseen kuin pelkkä nopeuskriteeri, mutta yhdistelmäkriteerin 1 painotus on hieman erilainen. Päiväliikenteessä yhdistelmäkriteerillä 1 ruuhkaantuminen kyetään ennakoimaan 6 prosenttiyksikköä useammin ja virheellinen ruuhkaantumisvaroitusta annetaan 3 prosenttiyksikköä useammin kuin pelkällä nopeuskriteerillä.

Yhdistelmäkriteerillä 2 keskityttiin yli 15 minuuttia kestäviin ruuhkiin. Jos tätä lyhyempiä ruuhkia ei pidetä vakavina, niin yhdistelmäkriteereillä päästään selvästi parempiin tuloksiin kuin pelkällä nopeuskriteerillä. Esimerkiksi päiväliikenteessä yhdistelmäkriteerillä 2 kyetään havaitsemaan kaikki yli 15 minuutin ruuhkat ja myös ruuhkan alkamattomuus osataan ennakoida 98 prosenttisesti. Myös pelkällä nopeuskriteerillä kyetään ennakoimaan kaikki yli 15 minuutin ruuhkat, mutta 50 prosentissa niistä tilanteista, jolloin ruuhka ei ole alkamassa, kriteeri ennakoit ruuhkaantumista.

Taulukko 12. Todennäköisyys, että ruuhkaantuminen tulee ennakoiduksi oikein useaan eri suureeseen perustuvilla kriteereillä (yhdistelmä) ja pelkkään keskinopeuteen perustuvalla kriteerillä (nopeus). Etäisyys optimista kertoo kriteerin hyvyden.

Kriteeri	Todennäköisyys ennakoida oikein	Aamuhuipun alku		Aamuhuippu	
		Yhdistelmä	Nopeus	Yhdistelmä	Nopeus
1	ruuhkaantuminen	77 %	85 %	81 %	88 %
	ruuhkaantumattomuus	76 %	58 %	62 %	24 %
	Etäisyys optimista	0,33	0,45	0,42	0,77
2	yli 15 min kestävän ruuhkan alku	100 %	100 %	100 %	100 %
	ruuhkaantumattomuus	76 %	58 %	83 %	24 %
	Etäisyys optimista	0,24	0,42	0,17	0,76
	alle 15 min kestävän ruuhkan alku	0 %	0 %	23 %	86 %
	ruuhkaantuminen	77 %	85 %	35 %	88 %
	ruuhkaantumattomuus	76 %	58 %	83 %	24 %
	Etäisyys optimista	0,33	0,45	0,67	0,77

Kriteeri	Todennäköisyys ennakoida oikein	Päiväliikenne		Iltahuipun alku	
		Yhdistelmä	Nopeus	Yhdistelmä	Nopeus
1	ruuhkaantuminen	76 %	70 %	88 %	89 %
	ruuhkaantumattomuus	47 %	50 %	53 %	39 %
	Etäisyys optimista	0,58	0,58	0,49	0,62
2	yli 15 min kestävän ruuhkan alku	100 %	100 %	89 %	100 %
	ruuhkaantumattomuus	98 %	50 %	81 %	39 %
	Etäisyys optimista	0,02	0,50	0,22	0,61
	alle 15 min kestävän ruuhkan alku	7 %	69 %	13 %	81 %
	ruuhkaantuminen	13 %	70 %	40 %	89 %
	ruuhkaantumattomuus	98 %	50 %	81 %	39 %
	Etäisyys optimista	0,87	0,58	0,63	0,62

Kriteeri	Todennäköisyys ennakoida oikein	Iltahuippu		Ilt- ja yöliikenne	
		Yhdistelmä	Nopeus	Yhdistelmä	Nopeus
1	ruuhkaantuminen	92 %	92 %	0 %	22 %
	ruuhkaantumattomuus	84 %	69 %	100 %	94 %
	Etäisyys optimista	0,18	0,32		
2	yli 15 min kestävän ruuhkan alku	75 %	100 %	Ei ole	
	ruuhkaantumattomuus	96 %	69 %		
	Etäisyys optimista	0,25	0,31		
	alle 15 min kestävän ruuhkan alku	11 %	89 %		
	ruuhkaantuminen	31 %	92 %		
	ruuhkaantumattomuus	96 %	69 %		
	Etäisyys optimista	0,69	0,32		

7 JOHTOPÄÄTÖKSIÄ

Liikenteen ohjausjärjestelmien tavoitteet liittyvät yleensä turvallisuuteen, sujuvuuteen ja liikenteen ympäristöhaittoihin. Kriteerit kulkevat usein käsi kädessä, sillä sujuva liikennevirta on turvallinen ja häiriötön liikenne taas takaa sujuvuuden. Sujuva liikenne on usein myös ympäristöystävällistä. Yksittäinen tavoite palvelee siis useaa eri tarkoitusta yhtä aikaa ja yksittäisellä ohjaustoimenpiteellä voidaan saavuttaa hyöty usealla eri rintamalla.

Eri syistä aiheutuvat liikenteen ongelmat voidaan usein ratkaista useiden erilaisten tavoitteiden avulla. Yksittäisen ongelman ratkaisemiseksi voidaan asettaa useita eri tavoitteita ja yksittäinen tavoite voi helpottaa useampaa eri ongelmaa. Koska tilanne on sangen monitahoinen, olisi hyvä, että järjestelmää suunniteltaessa pohdittaisiin ensimmäisen suunnitelmaluonnoksen synnyttyä sitä, voidaanko tielle jo asennetuilla/suunnitelluilla laitteilla soveltaa esimerkiksi kehittyneempää ohjausstrategiaa kuin alun perin suunniteltiin. Toinen vaihtoehto on pohtia, mitä lisäarvoa pienet lisäinvestoinnit mahdollisesti toisivat järjestelmälle. Samalla kannattaa pitää mielessä, miten järjestelmää kehitetään, jos/kun liikennemäärät kasvavat ja ongelmat pahenevat.

Jotta liikennettä voidaan ohjata tehokkaasti, täytyy liikennetilanne kyetä tunnistamaan ja ennakoimaan kyllin hyvin. Lisäksi tarvitaan hyvä ohjausstrategia, joka on varautunut erilaisiin ongelmatilanteisiin. Kun liikenneongelmiin kyetään reagoimaan mahdollisimman pian, ne saadaan selvitettyä nopeasti ja sekundäärinen häiriöiden riski pienenee. Häiriöiden nopea tunnistaminen, paikallistaminen ja selvittäminen pitävät liikenteen mahdollisimman sujuvana ja turvallisena.

Monet tulokset viittaavat siihen, että olosuhteisiin nähden oikeanlaisella ohjauksella saadaan aikaan haluttuja tuloksia: voidaan säätää keskinopeuden tasoa ja pienentää nopeuskeskihajontaa. Autoilijan subjektiivisen näkemyksen mukaan liian alhaiset nopeusrajoitukset ja "aiheettomat" varoitukset saattavat kuitenkin saada aikaan päinvastaisia tuloksia, kuten nopeuskeskihajonnan kasvua. Tulokset viittaavat siihen, ettei "turha" varovaisuus kannata liikenteen ohjauksessa, vaan sillä saatetaan jopa tehdä liikennevirrasta häiriöherkempi kuin se muutoin olisi.

Liikenteen ohjausta ja tiedotusta kuvaavat siis parhaiten sanat ajantasainen ja tilanteeseen sopiva. Tällä tarkoitetaan sitä, ettei toimenpiteillä saa ennakoita liikaa tulevaa, mutta ohjaus täytyy pitää koko ajan tilanteen tasalla. Turha ennakointi tai jälkijättöisyys näkyy liikennevirrassa ei-toivottuina ominaisuuksina.

Länsiväylän esimerkki osoitti, että pienillä toimenpiteillä ohjausstrategian perusteet olisivat helposti muutettavissa. Olemassa olevilla laitteilla ja ilmaisimilla voidaan liikennetilanne hahmottaa nykyistä kokonaisvaltaisemmin, jolloin käsitys ruuhkaantumisriskistä on huomattavasti todenmukaisempi kuin käyttämällä pelkkää nopeuteen perustuvaa kriteeriä. Esimerkin useaan eri tekijään perustuvat yhdistelmäkriteerit kehitettiin silmämääräisesti ruuhkailmiötä tarkastelemalla. Kriteerit eivät näin ollen ole varmastikaan edes optimaaliset, mutta jo tämä yksinkertainen esimerkki osoitti, että järjestelmän kyky ennakoita ruuhkaantuminen voitaisiin parantaa. Koska liikenneolosuhteita kuvaa on hyvin moniulotteinen muuttuja-avaruus, ruuhkaantumisriskin arvioimiseen olisi mahdollista kehittää esimerkiksi neuroverkko, joka systematisoisi menetelmän. Tällöin tulokset voisivat olla vielä parempia.

8 YHTEENVETO

Liikenteen ohjaus- ja tiedotusjärjestelmät koostuvat kolmesta pääosasta: 1) mittausosasta, 2) tulkintaosasta ja 3) tiedotus- tai ohjausosasta. Tutkimuksessa on selvitty näiden kolmen osan välisiä riippuvaisuuksia, jotta järjestelmistä saataisiin mahdollisimman suuri hyöty. Tutkimuksessa on myös pohdittu esimerkinomaisesti, minkälainen tulisi Länsiväylän automaattisen liikenteen ohjausjärjestelmän ohjausstrategian olla, jotta järjestelmän hyöty olisi mahdollisimman suuri.

Ensimmäinen askel liikenteellisen ongelman ratkaisemiseksi on poikkeavan liikennetilanteen tunnistaminen. Osa liikennetilanteista johtaa ongelmiin sekä ohjaus- ja tiedotustarpeisiin. Kun tällainen liikennetilanne on tunnistettu ja yksilöity, sille voidaan ryhtyä etsimään ratkaisua. Ratkaisu voidaan pilkkoa osatavoitteisiin. Kukin osatavoite voidaan saavuttaa yhdellä tai useammalla keinolla (ohjaustoimenpiteellä tai tiedottamalla) ja sama keino saattaa olla ratkaisuna useamman tavoitteen saavuttamiseksi. Kukin keino asettaa omat vaatimuksensa seuranta-, ohjaus- ja tiedotusjärjestelmälle.

Selvityksessä liikenteelliset ongelmat jaettiin neljään ryhmään ongelman aiheuttajan mukaan. Aiheuttajia olivat ylikysyntä, satunnaiset liikenteen häiriöt, poikkeuksellinen sää ja keli sekä tietyöt. Selvityksessä tarkasteltiin kolmea eri tietyyppiä: kaupunkimoottoritietä, taajamien ulkopuolista moottoritietä ja kaksikaistaista päätietä.

Liikenteen ohjausjärjestelmien tavoitteet liittyvät yleensä turvallisuuteen, välityskykyyn (sujuvuuteen ja matka-ajan ennustettavuuteen), energian kulutukseen ja/tai ympäristön saastumiseen. Prioriteetit riippuvat siitä, mitä tavoitteita halutaan painottaa. Turvallisuus- ja sujuvuustavoitteet ovat osin samoja, sillä sujuva liikennevirta on turvallinen ja häiriötön liikenne taas takaa sujuvuuden. Sujuva liikenne on usein myös ympäristöystävällistä.

On parempi estää ylikysynnästä johtuva ruuhkautuminen kuin yrittää purkaa jo syntynyt ruuhka. Ylikysynnän aiheuttamien liikenneongelmien hallinnan tavoitteet voidaan jakaa turvallisuus- ja sujuvuustavoitteisiin. Liikenteen turvallisuuden parantamiseksi halutaan harmonisoida nopeuksia sekä vähentää lyhyitä aikavälejä ja vaarallisten ohitusten määrää.

Tavoitteet, joiden avulla satunnaisten liikenteen häiriöiden aiheuttamia ongelmia yritetään ratkaista, liittyvät pääasiassa turvallisuuteen. Nopeustaso halutaan säätää sellaiseksi, ettei muutos tule yllätyksenä eikä häiriökohdasta ylävirtaan etenevä shokkiaalto aiheuta liian voimakkaita muutoksia liikennevirtaan ja johda näin sekundäärisiin ongelmiin ja vaaratilanteisiin. Sama on tietenkin tärkeää myös toistuvien ylikysyntätilanteiden tapauksessa.

Eri syistä aiheutuvat liikenteen ongelmat voidaan usein ratkaista erilaisten tavoitteiden avulla. Yksittäisen ongelman ratkaisemiseksi voidaan asettaa useita eri tavoitteita ja yksittäinen tavoite voi helpottaa useampaa eri ongelmaa. Tästä on hyvänä esimerkkinä nopeustason säätäminen, jonka avulla yritetään helpottaa useista eri syistä aiheutuvia liikenteen ongelmia.

Monet tulokset viittaavat siihen, että olosuhteisiin nähden oikeanlaisella ohjauksella saadaan aikaan haluttuja tuloksia: voidaan säätää keskinopeuden tasoa ja pienentää nopeuskeskihajontaa. Tulokset viittaavat kuitenkin siihen, ettei "turha" varovaisuus kannata liikenteen ohjauksessa, vaan sillä saate

taan jopa tehdä liikennevirrasta häiriöherkempi kuin se muutoin olisi. Parasta ohjausta ja liikenteen tiedotusta kuvaavat siis sanat ajantasainen ja tilanteeseen sopiva.

Seurantajärjestelmän rakenteeseen eli ilmaisimien sijaintiin vaikuttavat useat eri seikat, kuten suoritetaanko mittaus piste- vai linkkikohtaisin parametrein, halutaanko mittauksen avulla tunnistaa toistuvia ylikysyntätilanteita vai satunnaisten häiriöiden aiheuttamia ongelmia ja kuinka nopeasti ongelmiin pitää pystyä reagoimaan.

Länsiväylälle on asennettu liikenteen ruuhkautumisesta ja jonoista varoittava ohjausjärjestelmä, jonka tärkein tavoite on liikenneturvallisuuden parantaminen. Ohjausjärjestelmä ei poista Länsiväylän ruuhkia, mutta sen tavoitteena on lievittää ruuhkautumisen haittoja liikenteelle ja ympäristölle.

Arvioitaessa, pitääkö nopeusrajoitusta laskea tai nostaa ja ruuhkavaroitusta antaa, on käytössä nopeuden kynnysarvot. Ohjausstrategian heikkous on se, ettei järjestelmä kykene ennakoimaan ruuhkan syntymistä. Järjestelmä reagoi vasta sitten, kun nopeustaso on jo laskenut ja ruuhka päässyt synty-mään. Sen sijaan, että nopeusrajoituksia ainoastaan sopeutettaisiin vallitsevaan tilanteeseen, olisi parempi, että niillä yritettäisiin aktiivisesti pienentää ruuhkautumisen riskiä.

Hyvä strategia siis olisi, että kun virta tulee ennalta määritettyä riskirajaa häiriöherkemmäksi, nopeusrajoituksia lasketaan, jolloin häiriöiden riski saadaan pienemmäksi. Vastaavasti nopeusrajoitusta voidaan nostaa, kun arvioidaan, että häiriintymisen riski on ylemmällä nopeusrajoituksella riittävän pieni.

Ruuhkautumisen riski määritettiin usean eri tekijän funktiona. Oletuksena oli, ettei mikään olosuhderyhmä (ajankohtaan, liikennetilanteeseen tai ulkoisiin olosuhteisiin liittyvä) riitä yksinään kuvaamaan ruuhka- tai ruuhkautumisriskiä, vaan riittävän kokonaiskuvan saamiseksi, tilannetta on tarkasteltava kokonaisuutena.

Länsiväylän erään poikkileikkauksen perjantairuuhkien ennakkointiin kehitettiin esimerkkinä useampaan tekijään perustuvat kriteerit. Päivä jaettiin ruuhkan perusteella eri tyyppisiin osiin, joiden erityispiirteitä tutkittiin. Ohjauskriteerit pyrittiin valitsemaan siten, että ne ovat riittävän herkkiä, mutteivät aiheuta liikaa virrehälytyksiä. Kriteerissä 1 pyrittiin havaitsemaan kaikki ruuhkat ja kriteerissä 2 keskityttiin yli 15 minuutin mittaisiin ruuhkiin. Vertailukoh-tana oli parhaaksi määritelty pelkkään keskinopeuteen perustuva kriteeri.

Yhdistelmäkriteerit 1 johtavat parempiin tuloksiin kuin pelkkään nopeusraja-arvoon perustuva ennakkointi. Yhdistelmäkriteerit 1 eivät aina ennakoineet ruuhkien alkua aina aivan yhtä hyvin kuin pelkkä nopeuskriteeri, mutta ne johtivat selvästi harvemmin virheellisiin ruuhkaantumisvaroituksiin kuin pelkkä nopeuskriteeri.

Jos korkeintaan 15 minuutin mittaisia ruuhkia ei pidetä vakavina, niin yhdistelmäkriteereillä 2 päästiin selvästi parempiin tuloksiin kuin pelkällä nopeuskriteerillä. Pitkien ruuhkien ennakkointi onnistui molemmilla kriteereillä hyvin, mutta yhdistelmäkriteerit 2 tekivät huomattavasti vähemmän vääriä hälytyksiä kuin pelkkä nopeuskriteeri.

LÄHDELUETTELO

ALPPIVUORI K, ANILA M, PAJUNEN K (1995). *Valtatie 4:n Järvenpää-Mäntsälä-välin muuttuvan reittiopastusjärjestelmän vaikutukset*. Tielaitoksen selvityksiä 86/1995. Tielaitos, Kehittämiskeskus, Helsinki. 55+19 s.

ASHOK K, BEN-AKIVA M (1993). *Dynamic Origin-Destination Matrix Estimation and Prediction for Real-Time Traffic Management Systems*. 12th International Symposium on the Theory of Traffic Flow and Transportation, Berkeley, California. Transportation and Traffic Theory, Elsevier, Amsterdam, New York. s. 465–484.

BALZ W, ZACKOR H (1991). *Freeway Network Control*. In: Papageorgiou (Ed.): *Concise Encyclopedia of Traffic & Transportation Systems*. Pergamon Press. s. 156–162.

BELL M (1994). *Traffic Control*. Advanced Technology for Road Transport: IVHS and ATT (Toimittaja: Catling I). Artech House, Inc., Boston, USA. s. 49–64.

BEN-AKIVA M, CANTARELLA G, CASCETTA E, RUITER J DE, WHITTAKER J, KROES E (1992). *Real-Time Prediction of Traffic Congestion*. The 3rd International Conference on Vehicle Navigation and Information Systems, Oslo, Norway. Conference Record of Papers, Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, N. Y. s. 557–562.

BUSCH F (1991). *Incident Detection*. In: Papageorgiou (Ed.): *Concise Encyclopedia of Traffic & Transportation Systems*. Pergamon Press. s. 219–224.

CHANG E (1992). *A Neural Network Approach to Freeway Incident Detection*. The 3rd International Conference on Vehicle Navigation & Information Systems. Conference Record of Papers, Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, N. Y. s. 641–646.

CREMER M (1979). *Der Verkehrsfluß auf Schnellstraßen. Modelle, Überwachung, Regelung*. Ed. von Syrbe M, Thoma M, Fachberichte Messen, Steuern, Regeln. Sprinler-Verlag. 201 s.

DIA H, ROSE G (1997). *Development and Evaluation of Neural Network Freeway Incident Detection Models Using Field Data*. Transportation Research, Volume 5 C, Number 5 / 1997. s. 313–331.

DIA H, ROSE G (1998). *The Impact of Data Quantity on the Performance of Neural Network Freeway Incident Detection Models*. Neural Networks in Transport Applications (Toimittajat: Himanen V, Nijkamp P, Reggiani A). Ashgate, Aldershot, England. s. 311–340.

DREW D (1968). *Traffic Flow Theory and Control*. McGraw-Hill, Inc. 467 s.

FINCH D, KOMPFFNER P, LOCKWOOD C, MAYCOCK G (1994). *Speed, Speed Limits and Accidents*. Project Report 58, Transport Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, UK. 24 s.

HAUTALA R, SCHIROKOFF A, LEHTONEN M (2001). *Sää- ja kelitietoon perustuvan liikenteen ohjausjärjestelmän vaikutukset valtatiellä 1 välillä*

Sammatti-Salo. Tiehallinnon selvityksiä 51/2001, Tiehallinto, Helsinki. 51+4 s.

HCM (2000). *Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board.

HOBEIKA A, OZBAY K (1991). *A Dynamic Traffic Assignment Model in the Context of Real Time Driver Information System*. 24th ISATA International Symposium on Automotive Technology and Automation, Florence, Italy, 20–24th May 1991. Automotive Automation Limited, Croyden, England. s. 473–480.

HOLMA M (1991). *Kalman-suodatuksen periaatteet ja käyttö liikenneteknissä mittauksissa ja liikenteen ohjauksessa*. Matematiikan erikoistyö, Teknillinen korkeakoulu. 15+3 s.

HOOGEN E VAN DEN, SMULDERS S (1994). *Control by Variable Speed Signs: Results of the Dutch Experiment*. Seventh International Conference on Road Traffic Monitoring and Control, 26 - 28 April 1994. Conference Publication No. 391, The Institute of Electrical Engineers, IEE, London, UK. s. 145–149.

HOOSE N (1991). *Computer Image Processing in Traffic Engineering*. Research Studies Press Ltd., Taunton, Somerset, UK. 207 s.

INNAMAA S (1999). *Automaattiset liikenteenohjaus- ja liikenneinformaatiojärjestelmät*. Tielaitoksen selvityksiä 28/1999, Tielaitos, Helsinki. 141 s.

INNAMAA S (2001). *Short-Term Prediction of Highway Travel Time Using MLP-Neural Networks*. 8th World Congress on Intelligent Transport Systems. Sydney, Australia, 30 September – 4 October, 2001. 12 s.

INNAMAA S, PURSULA M (2000). *Liikennemäärän ja nopeuden lyhyen aikavälin ennustaminen*. Tielaitoksen selvityksiä 54/2000. Tielaitos, Helsinki. 101+3 s.

INNAMAA S, VANHANEN K, PURSULA M (2000). *Länsiväylän automaattisen liikenteenohjausjärjestelmän vaikutukset liikennevirtaan*. Tielaitoksen selvityksiä 53/2000. Tielaitos, Helsinki. 82+8 s.

JANSSEN W, HORST R VAN DER (1993). *Presenting Descriptive Information in Variable message Signing*. Transportation Research Record, No. 1403. s. 83–87.

KALLBERG H (1980). *Overtakings and Platoons on Two-Lane Rural Roads*. Tiedonanto 61, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tie- ja liikennelaboratorio. 104+6 s.

KESKI-SUOMEN TIEPIIRI (1995). *Muuttuvat nopeusrajoitukset Keski-Suomen tiepiirissä*. Tielaitoksen sisäisiä julkaisuja 64/1995. Tielaitos, Keski-Suomen tiepiiri, Tampere. 13+8 s.

KLIJNHOUT J (1991). *Freeway Control: An Overview*. In: Papageorgiou (Ed.): *Concise Encyclopedia of Traffic & Transportation Systems*. Pergamon Press. s. 152–156.

KOSONEN I (2001). *DIGITRAFFIC; Suunnitelma telematiikan kehittämiseksi liikenteen seurantaan, hallintaan ja ohjaukseen; Perusperiaatteet, mallinnus ja telematiikka-arkkitehtuuri*. Alustava suunnitelma tutkimuskokonaisuudeksi 13.2.2001, Teknillinen korkeakoulu, Liikennelaboratorio. 12 s.

KRAAN M, ZIJPP N VAN DER, TUTERT B, VONK T, MEGEN D VAN (1998). *Evaluating Network Wide Effects of VMS's in the Netherlands*. Paper submitted for presentation at the 78th Annual Meeting of the Transportation Research Board, January 10 - 14 1999, Washington, and for publication in Transportation Research Record. 18 s.

KULMALA R, FRÄNZEN S, DRYSELIUS B (1995). *Safety Evaluation of Incident Warning Systems, Integration of Results*. HOPES, Horizontal Project for the Evaluation of Safety, Drive II Project V2002, Deliverable 35, Work-package 31, Activity 31.8. 29+18 s.

KULMALA R, LUOMA S (2001a). *VIKING Monitoring State of the Art 2001*, Version 1.0 August 2001. Euro-Regional Project VIKING. 77 s.

KULMALA R, LUOMA S (2001b). *VIKING Monitoring Guidelines 2001*, Version 1.0 August 2001. Euro-Regional Project VIKING. 47 s.

KWON E (1991). *A New Approach for Real-Time Prediction of Traffic Demand-Diversion in Freeway Corridors*. Applications of Advanced Technologies in Transportation Engineering: Proceedings of the Second International Conference, New York, American Society of Civil Engineers. s. 398–402.

KWON E, STEPHANEDES Y (1994). *Comparative Evaluation of Adaptive and Neural-Network Exit Demand Prediction for Freeway Control*. Transportation Research Record 1446. s. 66–76.

LEE S, KIM D, KIM J, CHO B (1998). *Comparison of Models for Predicting Short-Term Travel Speeds*. Proceedings of 5th World Congress on Intelligent Transport Systems, 12–16 October 1998, Seoul, Korea. 9 s.

LEE Y-I, HWANG J-H (1998). *Development of an Incident Detection Algorithm Using Discrete Choice Model*. Konferenssi-cd, 5th World Congress on Intelligent Transport Systems, 12–16 October 1998, Seoul, Korea. 9 s.

LIKENNEMINISTERIÖ, TIELAITOS, LIKENNETURVA (1992). *Liikenneturvallisuuden käsikirja*. 458 s.

LUOMA S (1998). *Tieliikenteen sujuvuus ja sen mittaaminen*. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, Liikennetekniikka. 122 s.

MATSUI H, FUJITA M (1998). *Travel Time Prediction for Freeway Traffic Information by Neural Network Driven Fuzzy Reasoning*. Neural Networks in Transport Applications. (Toimittajat: Himanen V, Nijkamp P, Reggiani A.) s. 355–364.

NORMANN O (1942). *Results of Highway Capacity Studies*. Public Roads 23(4). S. 57–81.

PAPACOSTAS C (1987). *Fundamentals of Transportation Engineering*. Prentice-Hall International, Inc. 458 s.

PURSULA M (1988). *Detection and Traffic*, Kirjallisuusreferaatti. Tiedote 23, Liikennetekniikka, Teknillinen korkeakoulu, Espoo. 63 s.

PURSULA M, INNAMAA S (2001). *Liikennevirran ominaisuudet*. Opetusmoniste, Teknillinen korkeakoulu, Liikennelaboratorio. 150 s.

RANTA S (1997). *Ajonopeuden turvallisuusvaikutuksia koskevien tilastollisten tutkimusten analyysi*. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, Liikennetekniikka. 75+12 s.

RANTA S, KALLBERG V-P (1996). *Ajonopeuden turvallisuusvaikutuksia koskevien tilastollisten tutkimusten analyysi*. Tutkimusraportti 362, VTT, Yhdyskuntatekniikka, Liikenne ja kuljetukset, Espoo. 75+12 s.

RÄMÄ P (1997). *Sää- ja kelitietoon perustuvan liikenteen ohjausjärjestelmän vaikutukset Kotka-Hamina-moottoritieellä*. Tielaitoksen selvityksiä 1/1997, Tielaitos, Helsinki. 64+23 s.

RÄMÄ P, KULMALA R, HEINONEN M (1995). *Muuttuvien kelivaroitusmerkkien vaikutukset liikennekäyttäytymiseen Turun tiepiirissä talvella 1993–1994*. Tielaitoksen selvityksiä 36/1995, Tielaitos, Helsinki. 39 s.

RÄMÄ P, KULMALA R, HEINONEN M (1996). *Muuttuvien kelivaroitusmerkkien vaikutus ajonopeuksiin, aikaväleihin ja kuljettajien käsityksiin*. Tielaitoksen selvityksiä 1/1996, Tielaitos, Helsinki. 54+23 s.

SALUSJÄRVI M (1980). *Nopeusrajoituskokeilut Suomen yleisillä teillä*. Tiedonanto 55, VTT, Tie- ja liikennelaboratorio, Espoo. 196+9 s.

SAVO-KARJALAN TIEPIIRI (1995). *Kallansiltojen muuttuvan liikenteenohjauksen vaikutus selvitys*. Tielaitoksen selvityksiä. Tielaitos, Savo-Karjalan tiepiiri, Kuopio. 36+21 s.

SCHIROKOFF A, INNAMAA S, PORTAANKORVA P (2000). *Sääohjatun tien yksiajorataisen osuuden liikennetieto-ohjaus, nykytilan selvitys*. Kaakkois-Suomen tiepiirin selvityksiä 6/2000, Tielaitos, Kaakkois-Suomen tiepiiri, Kouvola 2000. 28+26 s.

SMITH B, DEMETSKY M (1994). *Short-Term Traffic Flow Prediction: Neural Network Approach*. Transportation Research Record 1453. s. 98–104.

SMITH B, DEMETSKY M (1997). *Traffic Flow Forecasting: Comparison of Modeling Approaches*. Journal of Transportation Engineering, Vol. 123, No. 4, July / August 1997. s. 261–266.

SMULDERS S (1990). *Control of Freeway Traffic Flow by Variable Speed Signs*. Transportation Research, Volume 24 B, No. 2. Pergamon Press plc, UK. s. 111–132.

STEPHANEDES Y (1991). *Dynamic Diversion Prediction for Real-Time Control in IVHS Networks*. 24th ISATA International Symposium on Automotive Technology and Automation, Florence, Italy, 20–24th May 1991. Automotive Automation Limited, Croyden, England. s. 459–463.

STEPHANEDES Y, ARGIROPOULOS I, MICHALOPOULOS P (1990a). *On-Line Traffic Assignment for Optimal Freeway Corridor Control*. Journal of Transportation Engineering, Volume 116, No. 6. s. 744–755.

STEPHANEDES Y, KWON E, MICHAPOULOS P (1990b). *On-Line Diversion Prediction for Dynamic Control and Vehicle Guidance in Freeway Corridors*. Transportation Research Record, No. 1287. s. 11–19.

TIEHALLINTO (2001a). *Tiehallinnon liikenteen hallinnan toimintalinjat – taustaraaportti*. Tiehallinnon toimintalinjat -sarja, Tiehallinto, Liikenteen palvelut, Helsinki. 53+36 s.

TIEHALLINTO (2001b). *Liikenteen seurannan valtakunnallinen esiselvitys*. Tiehallinnon selvityksiä 19/2001, Tiehallinto, Liikenteen palvelut, Helsinki. 52+3 s.

UUDENMAAN TIEPIIRI (1996). *Länsiväylän ruuhkavaroitus- ja kamerajärjestelmä*. Esite, Tielaitos, Uudenmaan tiepiiri, Helsinki. 4 s.

UUDENMAAN TIEPIIRI, TRAFICON OY (1998). *Länsiväylän ruuhkavaroitussjärjestelmä välillä Haukilahti – Katajaharju*. Liite 1.1 Ohjausjärjestelmä – Tekniset ja toiminnalliset laatuvaatimukset. 12 s.

VIATEK OY (1997). *LIIVI - Vaihtuvan nopeusrajoituksen vaikutuksesta liikennevirtaan*. Uudenmaan tiepiiri, Tielaitos, Helsinki. 31 s.

WANG Y, SISIPIKU V (1998). *Review and Evaluation of Incident Detection Methods*. Konferenssi-cd, 5th World Congress on Intelligent Transport Systems, 12–16 October 1998, Seoul, Korea. 9 s.

WARDMAN M, BONSALL P, SHIRES J (1997). *Driver Response to Variable Message Sign: a Stated Preference Investigation*. Transportation Research, Part C, Emerging Technologies, Volume 5 C, No. 6, (December 1997). s. 389–405.

WESTERMAN M (1995). *Real-Time Traffic Data Collection for Transportation Telematics*. Delft University of Technology, Delft. 266+43 s.

YANG H, KITAMURA R, JOVANIS P, VAUGHN K, ABDEL-ATY M (1993). *Exploration of Route Choice Behavior with Advanced Traveler Information Using Neural Network Concepts*. Transportation, No. 20. s. 199–223.

YIM Y, YGNACE J-L (1996). *Link Flow Evaluation Using Loop Detector Data: Traveler Response to Variable Message Signs*. Transportation Research Record, No. 1550 (Nov. 1996). s. 58–64.

ZHANG H, RITCHIE S, LO Z-P (1997). *Macroscopic Modeling of Freeway Traffic Using an Artificial Neural Network*. Transportation Research Record 1588. s. 110–119.

LIITTEET

- Liite A: Liikenteen ohjaus- ja tiedotusjärjestelmien vaikutus liikennevir-
taan
Liite B: Liikennetilanteen ennakointimenetelmät
Liite C: Länsiväylän liikennevirran ominaisuudet

LIIKENTEE OHJAUS- JA TIEDOTUSJÄRJESTELMIEN VAIKUTUS LIIKENNEVIRTAAN

Muuttuvat nopeusrajoitukset

Valtatiellä 1 tehdyn tutkimuksen (Viatak 1997) tuloksena saatiin, että nopeusrajoituksella 80 km/h ajoneuvojen keskimääräinen matkanopeus oli 86 km/h ja nopeusrajoituksella 100 km/h 96 km/h. Nopeusrajoituksen vaihtaminen muutti pistenopeuksia 5 km/h. Tiellä oli suuria nopeuden muutoksia (yli 10 km/h muutos kahden sekunnin aikana) merkitsevästi enemmän nopeusrajoituksella 100 km/h kuin 80 km/h rajoituksella ja pienillä liikennemäärillä enemmän kuin suurilla.

Valtatiellä 5 saatiin Kallansiltojen kohdalla tulokseksi (Savo-Karjalan tiepiiri 1995), että ajonopeudet olivat sulkukohdassa nopeusrajoituksen ollessa 60 km/h 30 - 50 km/h (keskinopeus 30 km/h) ja nopeusrajoituksella 30 km/h 15 - 25 km/h (keskinopeus 20 km/h). Kun nopeusrajoitus alennettiin muuttuvalla merkillä 100 km/h:stä 80 km/h:iin ja näytettiin samalla "avattava silta" -merkkiä, nopeudet laskivat noin 9 - 11 km/h mittauspisteessä, joka sijaitsi noin 2,5 km ennen siltoja.

Valtatiellä 7 (sääohjauksinen tie) saatiin tulokseksi (Rämä 1997), että kiinteä talvirajoitus 80 km/h alensi kaksikaistaisilla teillä koko liikenteen keskinopeutta 3,8 km/h verrattuna nopeusrajoitukseen 100 km/h ja moottoriteillä rajoituksen alentaminen 120 km/h:stä 100 km/h:iin alensi keskinopeutta 3,9 km/h. Muuttuvat nopeusrajoitukset alensivat talvikaudella koko liikenteen keskinopeutta kelin aiheuttaman aleneman lisäksi 2,5 km/h. Kesäkaudella nopeusrajoituksen alentamisen vaikutuksesta koko liikenteen keskinopeus aleni 5 - 6 km/h. Kun talvikauden aineistosta rajattiin pois hankalimmat kelit, nopeusrajoituksen muuttaminen 100 km/h:stä 80 km/h:iin alensi koko liikenteen nopeuksia 2 km/h enemmän kuin koko aineistossa eli 4,6 km/h. Muuttuvat nopeusrajoitukset pienensivät nopeuksien hajontaa.

Valtatiellä 9 välillä Vaajakoski - Lievestuore - Kuopion läänin raja liikenteen keskinopeus nousi valoisana aikana 5,1 km/h edellisen päivän nopeuksiin verrattuna, kun nopeusrajoitus nostettiin 80 km/h:stä arvoon 100 km/h (Keski-Suomen tiepiiri 1995).

Länsiväylällä (Innmaa ym. 2000) saatiin tulokseksi, että vaihtuvat nopeusrajoitukset muuttivat liikennevirran keskinopeutta nopeusrajoitusmuutoksen suuntaan. Kun nopeusrajoitusta laskettiin ruuhkattomissa olosuhteissa, nopeuden keskihajonta kasvoi.

Rannan & Kallbergin (1996) tekemän kirjallisuusselvityksen mukaan 80 km/h ja 100 km/h nopeusrajoitusalueilla keskinopeuksien ero on 10 km/h. Erilaisia tutkimuksia yhdistelemällä on saatu selville, että nopeusrajoituksen korottaminen lisää aina keskinopeutta ja laskeminen pienentää sitä. Pistejoukkoon sovitetun origon kautta kulkevan suoran mukaan 10 km/h rajoitusmuutos vaikuttaa keskinopeuteen keskimäärin 3,1 km/h ($\pm 0,6$ km/h) sekä rajoitusta korotettaessa että alennettaessa. Finch ym. (1994) puolestaan päätyi vastaavanlaisessa tarkastelussa esittämään, että 10 km/h rajoitusmuutos vaikuttaa keskinopeuteen 2,4 km/h.

Smulders (1990) on saanut tulokseksi moottoritieltä Rotterdamin läheltä, että liikenteen epävakaas väheni yhtenäistävän ohjauksen seurauksena. Ohjauksen aikana välityskyky ei laskenut. Muissa liikennettä kuvaavissa parametreissa, kuten keskinopeudessa, nopeuseroissa tai kaistajakauissa, ei havaittu merkitseviä muutoksia. Utrechtin lähellä pienien aikavälien osuus laski ja varianssi pieneni ohjauksen vaikutuksesta vasemmalla kaistalla. Oikealla kaistalla keskimääräinen aikaväli pieneni merkitsevästi. Keskinopeus laski hieman molemmilla kaistoilla.

Van den Hoogen & Smulders (1994) selvittivät kuljettajien suhtautumista vaihtuviin nopeusrajoituksiin haastattelututkimuksen avulla. Tutkimuksen tulokseksi saatiin, että suuri osa kuljettajista kertoi sopeuttavansa nopeutensa nopeusrajoituksen takia ja hyötynensä järjestelmästä. Nopeusrajoitusten vaikutuksista tehty analyysi osoittaa, että nopeudet alenivat ja nopeuden vaihtelut pienenevät ohjauksen johdosta kaikilla kaistoilla. Shokkiaaltojen määrä ja vakavuus laskivat. Myös aikavälien vaihtelu pieneni. Ohjauksen aikana keskinopeus laski ja keskimääräinen varausaste kasvoi.

Muuttuvat kelivaroitusmerkit

Ensimmäisenä koetalvena liukkaasta varoittavan muuttuvan liikennemerkkin todettiin alentavan Turun tiepiirissä ajonopeutta noin 2 - 4 km/h. Vaikutukset hävisivät 440 - 1 100 metrin päässä merkistä (Rämä ym. 1995). Toisena koetalvena merkki vähensi kiinteästi valaistuna liikenteen keskinopeutta merkin jälkeen noin 1 km/h ja vilkkuvana noin 2 km/h. Vaikutukset olivat yleensä hieman suurempia vapaiden ajoneuvojen osalta sekä pimeällä. Merkki ei yleensä vaikuttanut aikaväleihin ja sen vaikutuksen nopeuksiin arvioitiin kestävän noin 3 kilometrin päähän. Vilkkuvana viesti näytti vaikuttavan kuljettajien käyttäytymiseen pidempään. (Rämä ym. 1996.)

Kun sääohjauksisella tiellä käytettiin talvella nopeusrajoituksen lisäksi liukkaasta varoittavaa merkkiä, keskinopeudet alenivat merkkijohdistelmän vaikutuksesta vähemmän kuin pelkän alennetun rajoituksen vaikutuksesta. Nopeusprofiileista nähdään, että "liukas ajorata" -merkkiä käytettäessä kelin ja merkkien yhteisvaikutus nopeuteen oli 15 km/h luokkaa. (Rämä 1997.)

Länsiväylällä liukkaasta ajoradasta kertovat varoitusmerkit saivat autoilijat alentamaan nopeuttaan verrattuna samoihin olosuhteisiin ja nopeusrajoitukseen ilman varoitusta (Innamaa ym. 2000).

Muuttuvat turvaväliopasteet

Ensimmäisen talven tutkimuksissa Turun tiepiirissä (Rämä ym. 1995) saatiin tulokseksi, että turvaväliopaste vähensi alle 1,5 sekunnin etäisyydellä ajavien osuutta jonoissa. Pitävällä kelillä vähenemä arvioitiin 28 - 48 prosentiksi ja liukkaalla kelillä 37 - 47 prosentiksi. Toisen talven tutkimuksissa (Rämä ym. 1996) opaste alensi keskinopeuksia merkin jälkeen noin 1 km/h pitävällä kelillä. Turvaväliopaste vähensi alle 1,5 sekunnin aikavälien osuutta jonoissa noin 40 prosenttia. Turvaväliopaste vaikutti noin 8 km matkan ajan. Kun merkkiin liitettiin lisäksi "suositus", sen vaikutus aikaväleihin väheni lähes 10 prosenttiyksikköä.

Sääohjauksisella tiellä tehdyn tutkimuksen mukaan kehoitus "muista turvaväli" ei vähentänyt alle 1,5 sekunnin etäisyydellä ajavien osuutta jonossa. (Rämä 1997.)

Ruuhkasta kertovat muuttuvat opasteet

Juhannusliikenteessä valtatieltä 4 vaihtoehtoiselle reitille vaihtavien ajoneuvojen osuus kasvoi reittiopastusjärjestelmän käytön myötä vähintään 5 - 8 prosenttiyksikköä. Elokuisen viikonloppuruuhkan aikana poistumisprosentin laskettiin olleen 5 - 20 prosenttiyksikköä suurempi. Reittiopastuksen päällä olon vaikutus näytti jatkuvan joissain tilanteissa vielä pitkään, vaikka ohjaus oli jo kytketty pois päältä. Syyskuisen perjantain aikana poistumisprosentti oli 0 - 8 prosenttiyksikköä suurempi reittiopastuksen ollessa päällä. Haastattelututkimuksessa noin neljännes vaihtoehtoista reittiä ajavista ilmoitti reittivalintansa syyksi opastuksen. Reittiopastus aiheutti jonkin verran ei-toivottua ajokäyttäytymistä. (Alppivuori ym. 1995.)

Länsiväylällä tehdyssä tutkimuksessa havaittiin, että kun ruuhkattomalle liikenteelle näytettiin jonovaroitusmerkkejä, liikennevirran keskinopeus oli jonkin verran korkeampi kuin vastaavalla nopeusrajoituksella ilman varoitusta (Innamaa ym. 2000).

Drive II:een kuuluvassa HOPES-projektissa (Kulmala ym. 1995) kävi ilmi, että suurta osaa onnettomuuksista voidaan onnettomuustyyppin ja onnettomuuden syyn perusteella pitää sellaisina, että ne olisi mahdollisesti voitu välttää varoittamalla kuljettajaa liikenteen häiriöistä. Tutkimuksessa selvittiin myös muuttuvien opasteiden viestityypin vaikutusta. Saadut tulokset eivät tukenee oletusta, että mitä yksinkertaisempi viesti sitä suurempi vaihtelu kuljettajien käyttäytymisessä verrattuna yksilöidympään viestiin. Kaikentyyppisillä varoituksilla oli positiivinen vaikutus kuljettajien käyttäytymiseen.

Hollantilaisessa simulointiin perustuvassa tutkimuksessa (Janssen & van der Horst 1993) selvitettiin, kuinka erilaiset muuttuvissa opasteissa esitetyt ruuhkaa koskevat viestit vaikuttavat kuljettajien reitinvalintaan. Saadut tulokset osoittavat, että tiedotusten antotavalla ja tiedon luotettavuudella on vaikutusta siihen, poikkeako kuljettaja tavalliselta reitiltä vai ei. Mitä huonommalta liikennetilanne vaikuttaa, sitä useammin kuljettaja valitsee vaihtoehtoisen reitin.

Kraan ym. (1998) ovat tehneet yhteenvedon tutkimuksista, jotka ovat selvittäneet Amsterdamin alueen muuttuvien opasteiden vaikutuksia liikenteeseen. Kuljettajat pitivät muuttuvia opasteita erittäin hyödyllisinä ja opasteita selkeinä ja helposti ymmärrettävinä. Järjestelmän käyttäjät olivat sitä mieltä, että järjestelmä on helppokäyttöinen, mutta että se on herkkä sähköisille häiriöille. Poliisien mukaan järjestelmän vaikutukset ovat liikenteen häiriön satuesssa huomattavat ja opasteiden antama tiedotus luotettavaa. Järjestelmän vaikutuksesta liikenneverkon käyttöaste on parantunut. Muutokset viivytysissä tai reitinvalinnassa eivät ole suuria, mutta erot ovat kuitenkin merkittäviä. Mitä pidemmästä jonosta opaste kertoi, sitä pienempi osa autoilijoista valitsi ruuhkaisemman reitin.

SIRIUS on suurin kaupunkialueella tehty kehittyneiden liikenteen tiedotusjärjestelmien ja automaattisen liikenteen hallinnan kenttäkoe Euroopassa. Yim ja Ygnace (1996) tutkivat sen avulla muuttuvien opasteiden vaikutusta

yksittäisten linkkien liikennemääriin. Tutkimukset osoittivat, että ruuhkasta kertova opaste laski liikennemäärää 3,68 prosenttia. Moottoritien liittymisrampin liikennemäärän laskun voimakkuus on muuttuvan opasteen kertoman moottoritien ruuhkan funktio. Muuttuvat opasteet vaikuttivat kuljettajiin tehokkaimmin silloin, kun ruuhka oli kasvamassa. Opasteiden vaikutus kuljettajiin oli aamuruuhkan aikana voimakkaampi kuin iltaruuhkan aikana.

Wardman ym. (1997) halusivat laajentaa SP-tutkimuksen avulla jo tehtyjä tutkimuksia muuttuvien opasteiden vaikutuksista. Tulokset osoittavat, että kuljettajat valitsevat herkimmin vaihtoehtoisen reitin, kun viivytyksen syynä on onnettomuus. Se, ettei syytä kerrottu lainkaan, oli vaihtoehtoista tehottomin. Tapauksissa, että viivytyksen syynä oli ruuhka tai tietyö, opasteen vaikutus oli hyvin samankaltainen. Kuljettajat arvioivat näkyvien jonojen vaikutuksen viivytykseen yllättävän pieneksi.

Yang ym. (1993) selvittivät kuljettajien reitinvalintakäyttäytymistä tietokonesimulaation avulla. Tulosten mukaan suurin osa kuljettajista perusti reitinvalintapäätöksensä viimeisimpiin kokemuksiinsa ja että henkilökohtaisilla ominaisuuksilla oli suuri vaikutus. Ajokokemuksella vaikutti olevan suurempi vaikutus moottoritien kuin sivutien valintaan.

LIIKENNETILANTEEN ENNAKOINTIMENETELMÄT

Dynaamiset liikenteen ohjaus- tai tiedotusjärjestelmät eivät voi toimia reaktiivisesti, vaan niiden täytyy osata ennakoida liikennetilanteet ja sopeuttaa strategiansa ajoissa. Se, että järjestelmä pystyy jatkuvasti päivittämään liikennemäärä- ja matka-aikaennusteita useita minuutteja eteenpäin käyttämällä reaaliaikaista liikennedatata, on ehdoton dynaamisen liikenteen ohjauksen ja liikenteen tiedotusjärjestelmien toiminnan edellytys. (Smith & Demetsky 1997.)

Liikenne-ennusteelle asetetut edellytykset (kuten ennusteen tarkkuus ja ennustejakson pituus) ovat kuitenkin voimakkaasti riippuvaisia kulloisestakin sovelluksesta. Siinä missä harvoin ruuhkautuvalla tiellä voi riittää historia-tietokannan avulla määritetty estimaatti liikenteen käyttäytymisestä (esim. juhannuksen menoruuhkan käyttäytyminen), voi toisissa sovelluksissa olla tärkeää tietää liikenteen käyttäytyminen hyvin tarkkaan 15 minuuttia eteenpäin.

Smith & Demetskyn (1997) tekemässä vertailussa tutkittiin kahta uutta liikenteen ennustamismenetelmää (neuroverkko ja lähin naapuri) sekä kahta perinteistä mallia (keskiarvo ja ARIMA). Mallien tehtävänä oli ennustaa moottoritien liikennemäärää aikaisempien liikennemäärähavaintojen perusteella. Liikennemäärätiedot mitattiin induktioilmaisimilla. Smith & Demetskyn saamien tulosten perusteella lähin naapuri -menetelmä havaittiin paremmaksi kuin muut. Toiseksi parhaaksi osoittautui neuroverkko ja kolmanneksi jäi keskiarvomalli. ARIMA-mallia ei voitu käyttää vajaalla datalla. Se oli kuitenkin hieman parempi kuin keskiarvomalli.

Smith & Demetsky (1994) tekivät jo aikaisemmin vastaavanlaisen vertailun neuroverkko-, ARIMA- ja keskiarvomallin välillä. Tämän vertailun tulokset olivat hyvin samansuuntaisia. Myös näiden aikaisempien mallien tehtävänä oli ennustaa moottoritien liikennemäärää. Tutkimuskohteessa oli kamera- ja induktioilmaisimet, jotka tuottivat tietoa liikennemäärästä, keskinopeudesta sekä keskimääräisestä varausasteesta 15 minuutin jaksoilta. Lisäksi tiesäätiasema antoi ennustemallien käyttöön tiedot ilman lämpötilasta ja siitä, oliko tienpinta kuiva vai märkä.

Myös Lee ym. (1998) ovat tehneet vertailun erilaisten matkanopeuksien lyhyen aikavälin ennustamismenetelmien välillä. He vertasivat usean selittäjän regressio-, ARIMA-, neuroverkko- ja Kalman-suodatinmalleja. Myös heidän tuloksensa ovat hyvin samansuuntaisia: neuroverkko- ja Kalman-suodatinmalli tekivät tarkempia ennusteita kuin regressio- tai ARIMA-mallit.

Selvityksessä on esitelty kaksi esimerkkiä (Hobeika & Ozbay 1991 ja Stephanedes ym. 1990a) matka-aikojen tai viivytysten ennustamisesta dynaamisen liikenteen simuloinnin ja sijoittelun avulla. Molemmissa menetelmissä liikenne ensin sijoitellaan verkolle, suoritetaan simulointi, selvitetään viivytykset (matka-ajat) kullekin linkille, suoritetaan sijoittelu uudestaan ja niin edelleen, kunnes saavutetaan tasapaino.

Ben-Akiva ym. (1992) ovat suunnitelleet Rotterdamin liikenteen seurantajärjestelmää varten ruuhkan ennustamisjärjestelmän. Ennusteiden tekemiseen he valitsivat DYNA-DTMS-mallin, joka käyttää tietolähteinään reaaliaikaista induktioilmaisimilla kerättyä liikennedatata, liikenteestä koottua tietokantaa

sekä liikenneverkon infrastruktuuritietoja. Mallin lähtötietoina käytetään liikennemäärää, keskinopeutta ja nopeuden keskihajontaa, varausastetta sekä tietoa ruuhkasta ja aineiston laadusta. Mallin tehtävänä on ennustaa liikennemääriä ja keskimatkanopeuksia sekä tieto siitä, onko tiellä ruuhkaa vai ei. Malli on yhdistelmä tilastollisesta liikennemallista ja dynaamisesta liikenteen sijoittelumallista.

Stephanedes ym. (1990b, Kwon 1991, Stephanedes 1991) halusivat myös kehittää moottoriteliikenteen kysynnälle ja jakautumiselle luotettavan ennustamisalgoritmin, joka tunnistaisi liikennevirran ominaisuudet reaaliajassa ja jota voitaisiin käyttää dynaamisessa liikenteen ohjauksessa ja ajoneuvojen opastamisessa. Heidän mallinsa käyttää liikenteen jakauman ennustamisessa rekursiivista parametrien tunnistamista, joka perustuu laajennettuun Kalman-suodattimeen.

Ashok & Ben-Akiva (1993) ovat kehittäneet periaatteet reaaliaikaiseen aika-riippuvaisten lähtöpaikka-määräpaikkamatriisien estimoimiseen ja ennustamiseen. Myös heidän ongelmansa on muotoiltu Kalman-suodattimeksi. Suodattimessa tilavektori koostuu eroista, joita lähtöpaikka-määräpaikkaparien välisissä liikennemäärissä on edellisiin estimaatteihin verrattuna. Lähtöpaikka-määräpaikkaparien välisten liikennevirtojen vaihteluiden ennusteita muokataan kunkin aikajakson lopulla saatujen linkkikohtaisten liikennelaskentojen tulosten perusteella.

Matsui & Fujita (1998) taas ovat kehittäneet moottoriteiden liikenteen tiedotusjärjestelmien käyttöön neuroverkkoihin ja sumeaaan päättelyyn perustuvan matka-ajan ennustamismenetelmän. Mallissa ennusteen syötetietoina käytetään matka-aikaa ajoneuvon lähtöhetkellä ja tiejaksolla olevien ajoneuvojen lukumäärää. Sumeaa päättelyä varten tehtiin useita ohjaussääntöjä. Sumean päättelyn säännön jos-osa ja sitten-osa rakennettiin neuroverkkoihin.

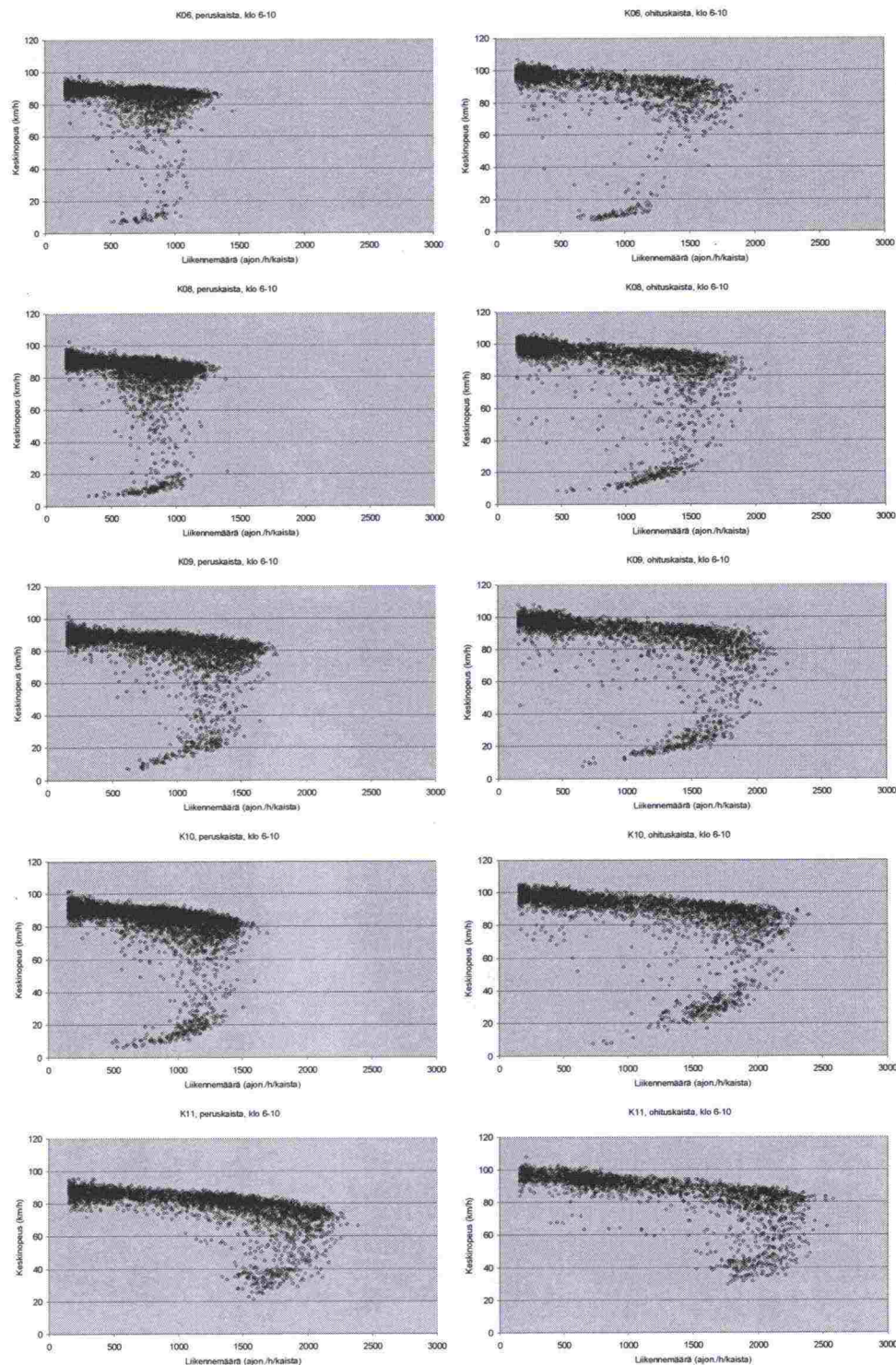
Kwon & Stephanedes (1994) ovat rakentaneet neuroverkkomallin liikennemäärien ennustamiseen moottoritien poistumisramppien automaattista liikenteen ohjausta varten. Mallia verrattiin olemassa olevaan UTCS-2-malliin ja mukautuvaparametriseen malliin, joka ennustaa liikennemäärät Kalman-suodattimen avulla. UTCS-2-malli oli jokaisessa vertailussa huonoin. Mukautuvaparametrinen malli ja neuroverkkomalli tekivät vuorotellen pienimmät virheet.

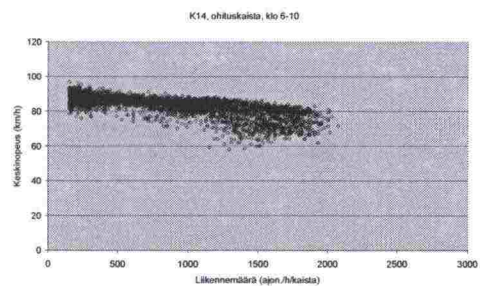
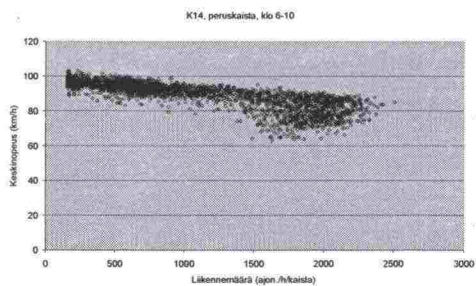
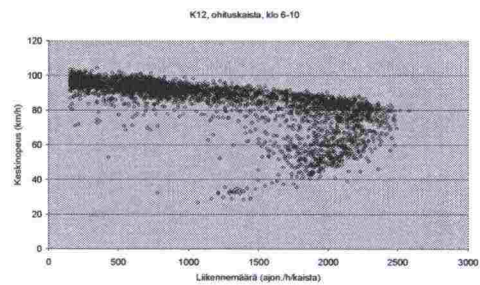
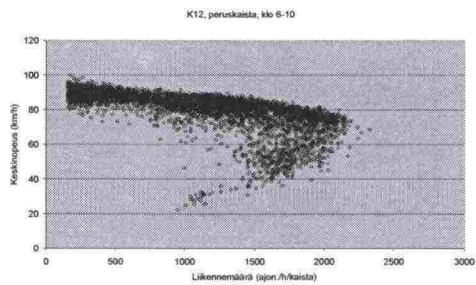
Zhang ym. (1997) ovat kehittäneet neuroverkkoon perustuvan ennustemallin dynaamisten liikenteen ohjausjärjestelmien tarpeisiin. Neuroverkko rakennettiin mallintamaan Papageorgioun laajentamaa Paynen kontinuumimallia.

Teknillisessä korkeakoulussa on tutkittu lyhyen liikennemäärän ja keskinopeuden (Innamaa & Pursula 2000) sekä matka-ajan (Innamaa 2001) lyhyen aikavälin ennustamista. Mallit perustuivat monikerroserseptronineuroverkkoihin. Liikennemäärä- ja keskinopeusennusteissa käytettiin syöteinä vastaavia induktioilmaisimilla viimeksi mitattuja suureita. Matka-aikaennusteet perustuivat kiinteillä kamerailmaisimilla mitattuihin matka-aikasuureisiin sekä induktioilmaisimilla mitattuihin liikennemäärä- ja keskinopeustietoihin.

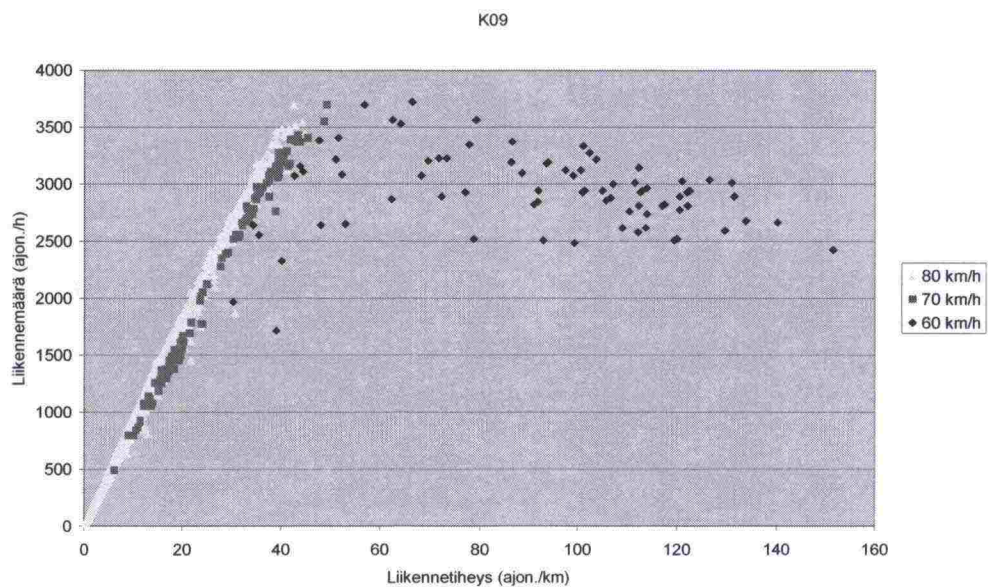
LÄNSIVÄYLÄN LIIKENNEVIRRRAN OMINAISUUDET

**Kaistakohtaiset liikennemäärä-nopeushavainnot poikkileikkauksittain
aamuliikenteessä (klo 6–10)**

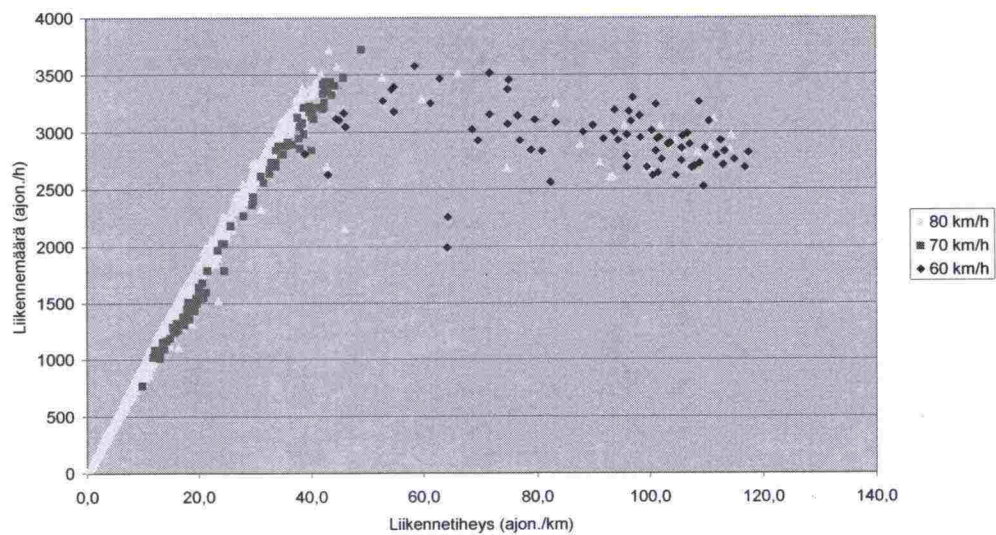




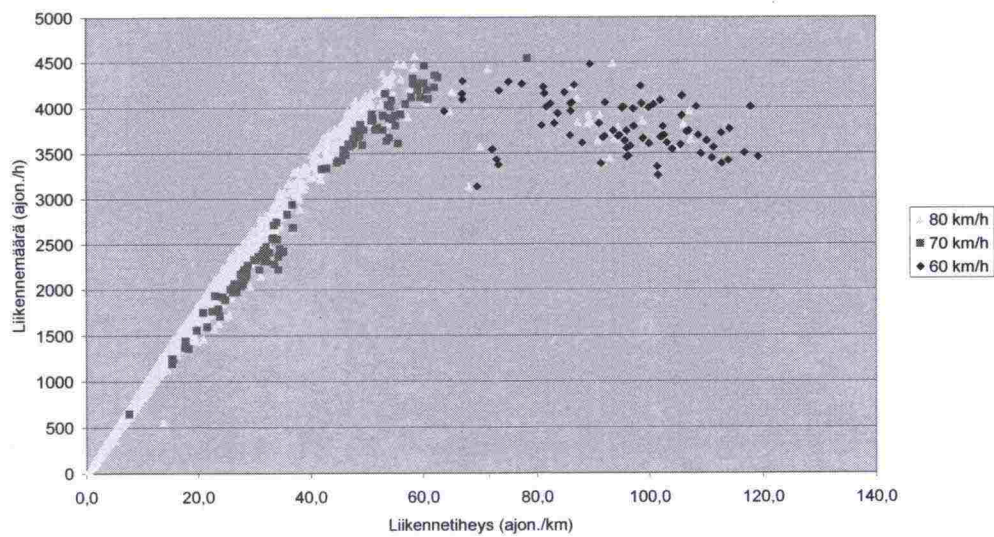
Liikennemäärä-liikennetiheyshavainnot eri nopeusrajoituksilla



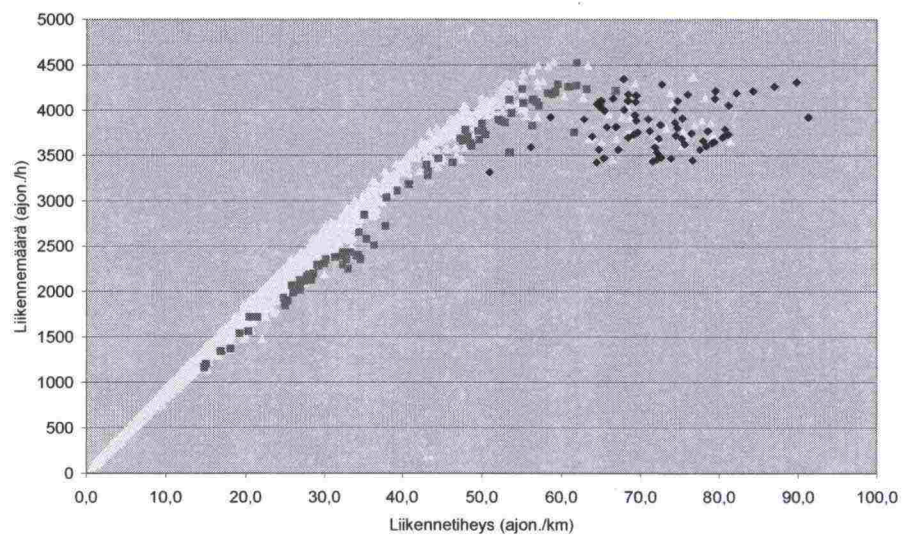
K10



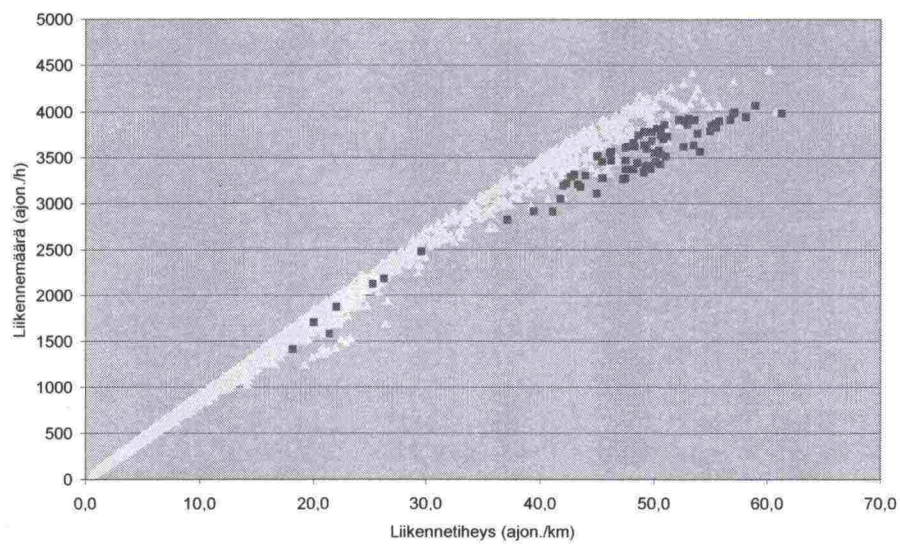
K11



K12



K14



ISSN 1457-9871
ISBN 951-726-898-X
TIEH 3200755